

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Vláknově optické tenzometry pro automobilový průmysl
Fiber optical strain gauge for car industry

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jan Krejčí

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Vláknově optické tenzometry pro automobilový průmysl
Fiber optical strain gauge for car industry

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši o využití vláknově optických tenzometrů a popište základní principy jejich činnosti.
2. Realizujte funkční model pohyblivého objektu s možností uložení vláknového tenzometru.
3. Změřte závislosti odezvy vláknového tenzometru s intenzitní modulací na poloze a velikostech působících sil.
4. Proveďte rozbor citlivosti pro SM a MM vlákna včetně plastových.

Seznam doporučené odborné literatury:

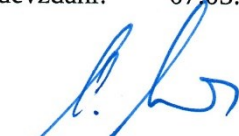
Podle pokynů vedoucího DP.

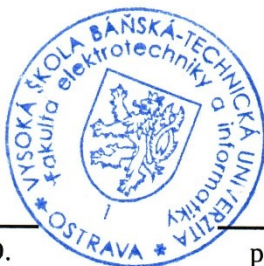
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

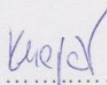



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 2. května 2014


.....
Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. RNDr. Vladimíru Vašinkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Také bych rád poděkoval Ing. Janu Skapovi, Ph.D. za konzultaci při zpracování získaných dat.

Abstrakt

Optické tenzometry patří do skupiny optických senzorů. Slouží k měření mechanického napětí na povrchu součástí, prostřednictvím měření její deformace. Pro experimentální otestování využití optických tenzometrů v automobilovém průmyslu byl použit dálkově řízený model vozidla v měřítku 1:10. Tento model byl osazen hliníkovou nástavbou, ke které bylo možné uchytit optický tenzometr. Díky pěti měřicím pozicím na vozidle a čtyřem možným orientacím osazení tenzometru bylo dosaženo 20 unikátních měřicích konfigurací. V jednotlivých konfiguracích byly optickým tenzometrem zachyceny průběhy nárazu vozidla do pevné překážky. Z těchto hodnot bylo matematickými úpravami zjištěno amplitudové spektrum nárazu pro jednotlivé měřicí kombinace. Díky znalosti amplitudového spektra při pohybu vozidla bylo možné vypočítat přenosové funkce pro jednotlivé měřicí konfigurace. Po aplikování rozhodovacích úrovní přenosu bylo možné určit počty signifikantních frekvencí pro jednotlivé konfigurace, díky kterým bylo umožněno nalézt nejvhodnější umístění tenzometru.

Klíčová slova

Vláknově optické senzory, Optické senzory, Tenzometr, Optický tenzometr, Intezitní tenzometr

Abstract

Optic strain gauges belong to group of fiber optic sensors. They are used to measure tension on component surface by measuring its deformation. For experimental testing of usage optic strain gauge in car industry was used remote-controlled car model in 1:10 scale. This model was equipped with aluminum construction, to which can be mounted optical strain gauge. Due to five measuring positions on the vehicle and the four possible orientations of the strain gauge installation was achieved 20 unique measure configurations. In each configuration, the optical strain gauge captured processes during impact of the vehicle to a fixed obstacle. Captured processes have been mathematically adjusted to amplitude spectrums, which are unique for each measurement combinations. Due to knowledge of amplitude spectrum of moving vehicle was allowed to calculate transfer functions for each measurement configurations. After applying the transfer decision-making levels was allowed to determine the number of significant frequencies for each configuration. The number of frequencies allowed to finding the best location for optical strain gauge on the vehicle.

Key words

Fiber optic strain gauge, Optic sensor, Strain gauge, Optic strain gauge, Intensity modulated strain gauge

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
X	μm	Velikost radiálního posunu
U	V	Elektrické napětí
ω ₀	μm	Průměr vidového pole
R	Ω	Elektrický odpor
I	mA	Elektrický proud
F	Hz	Frekvence
λ	nm	Vlnová délka

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
SM	Single Mode	Jednomódové vlákno
MM	Multi Mode	Vícemódové vlákno
LAN	Local Area Network	Místní síť
NA	Numeric aperture	Numerická apertura
PMNA	Polymethylmetakrylat	Polymethylmetakrylát
POF	Plastic Optic Fiber	Plastová optická vlákna
LED	Light Emitting Diode	Světlo vyzařující dioda
LD	Laser Diode	Laserová dioda
SI	Step index	Skoková změna indexu lomu
GI	Gradient index	Gradientní změna indexu lomu
Ge	Germanium	Germanium
Si	Silicium	Křemík
3D	3-Dimensional	Trojrozměrný model
SC	SC conector	Typ optického konektoru
FFT	Fast Fourier transform	Rychlá Fourierova transformace

Obsah

Úvod	1
1 Úvod do problematiky	2
1.1 Optická vlákna	2
1.2 Zdroje optického záření	4
1.3 Detektory optického záření	5
1.4 Vláknově optické senzory	7
1.5 Intenzitní senzory	9
1.6 Tenzometry a intenzitní senzory	11
1.7 Rozbor citlivosti SM, MM a POF vláken	14
2 Měřicí soustava	17
2.1 Model vozidla	17
2.2 Optický tenzometr	19
2.3 Elektronická část	22
2.4 Kompletní zapojení	23
3 Experimentální měření	25
3.1 Měření vlastních kmitů vozidla	27
3.2 Měření průběhů nárazů vozidla	31
3.3 Vyhodnocení získaných dat	34
4 Závěr	38
Použitá literatura	40
Přílohy	i
Seznam příloh	ii

Úvod

Vláknově optické tenzometry patří do velké skupiny optických senzorů, jejichž vznik byl umožněn technologickým pokrokem při vývoji komunikačních optických vláken. Díky dosažení vhodných přenosových parametrů bylo umožněno jejich použití k měření většiny fyzikálních veličin. Optické senzory jsou obecně složeny ze tří komponentů, kterými jsou: optický komunikační kanál, optická snímací jednotka, opto-elektrická jednotka.

Optický tenzometr je prvek schopný měřit mechanické napětí na povrchu součástky prostřednictvím měření deformace.

Cílem práce bylo navrhnout a sestavit prototyp optického tenzometru, který bude namontován na dálkově řízeném modelu vozidla. Pomocí tenzometru budou zachyceny průběhy změny tenze při nárazu vozidla do pevné překážky. Získaná data budou vyhodnocena a budou získána amplitudová spektra nárazů pro jednotlivá měřicí místa a orientace optického tenzometru. Následně bude vybrána nejvhodnější konfigurace polohy optického tenzometru.

První kapitola této práce obsahuje teoretický úvod nezbytný pro pochopení řešené problematiky. Jsou v ní popsány základní principy funkce a typy optických vláken, prozkoumány vlastnosti a principy zdrojů a detektorů optického záření. Zároveň je zde objasněna funkce a rozdělení vláknově optických senzorů, také je podrobněji popsán princip použitého optického tenzometru.

Druhá kapitola se zabývá výběrem vhodného modelu vozidla a stavbou kovové měřicí nástavby. Taktéž je popsán návrh a konstrukce použitého optického tenzometru, kterým budou následně zaznamenávány průběhy nárazů.

Náplní třetí kapitoly je popis jednotlivých měření a jejich rozbor. Jsou zde provedena měření vlastních kmitů vozidla, které ovlivňují všechny naměřené hodnoty. Taktéž je zde popsán způsob, kterým byl proveden výpočet amplitudového spektra vlastních vibrací vozidla. Následuje pracovní postup měření průběhu nárazu vozidla. Získaná data jsou následně upravena a je na nich provedena rychlá Fourierova transformace. Z rozdílu výstupního a vstupního spektra je počítána přenosová funkce, ze které je pomocí poměrových kritérií zjištěno, na jakém počtu frekvencí dochází k projevům nárazu při aktuální konfiguraci. Vyhodnocení nejlepší konfigurace polohy a orientace optického tenzometru bylo provedeno pomocí porovnání počtů zjištěných frekvencí. Při nejvhodnější konfiguraci bylo zachyceno nejvíce frekvencí, které umožňují získat nejvíce identifikátorů popisujících podmínky nárazu.

Součástí závěru je diskuze získaných dat a úvaha nad dalším směrem výzkumu při vývoji optických tenzometrů pro automobilový průmysl.

1 Úvod do problematiky

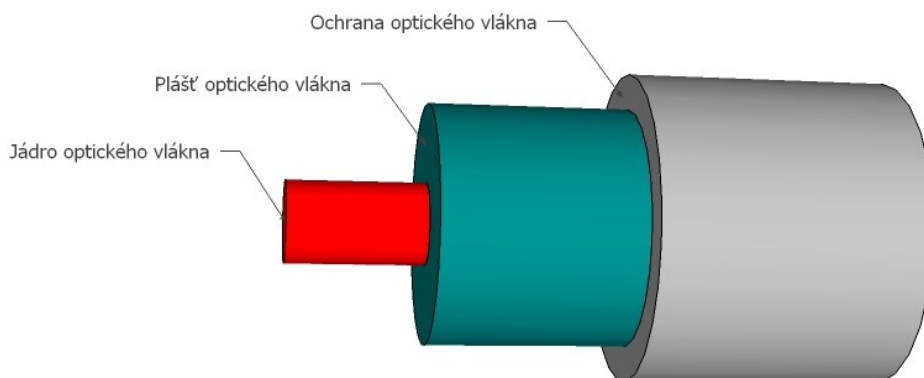
Použití optických vláken jako senzorů detekujících fyzikální veličiny bylo umožněno vyvinutím nízko-útlumových optických vláken, které je datováno ke konci 70. let minulého století. Postupem času našly opto-vláknové senzory cestu do téměř všech odvětví, jelikož jsou schopny měřit většinu fyzikálních veličin. Optické senzory jsou obecně složeny ze tří komponentů, kterými jsou: optický komunikační kanál, optická snímací jednotka, opto-elektrická jednotka.

Optický komunikační kanál senzoru je tvořen optickými vlákny, která vedou světelné záření od zdroje k vstupu do optické snímací jednotky. Taktéž vedou již modulované světlo z výstupu snímací jednotky do opto-elektrické jednotky, která je tvořena detektorem světelného záření.

1.1 Optická vlákna

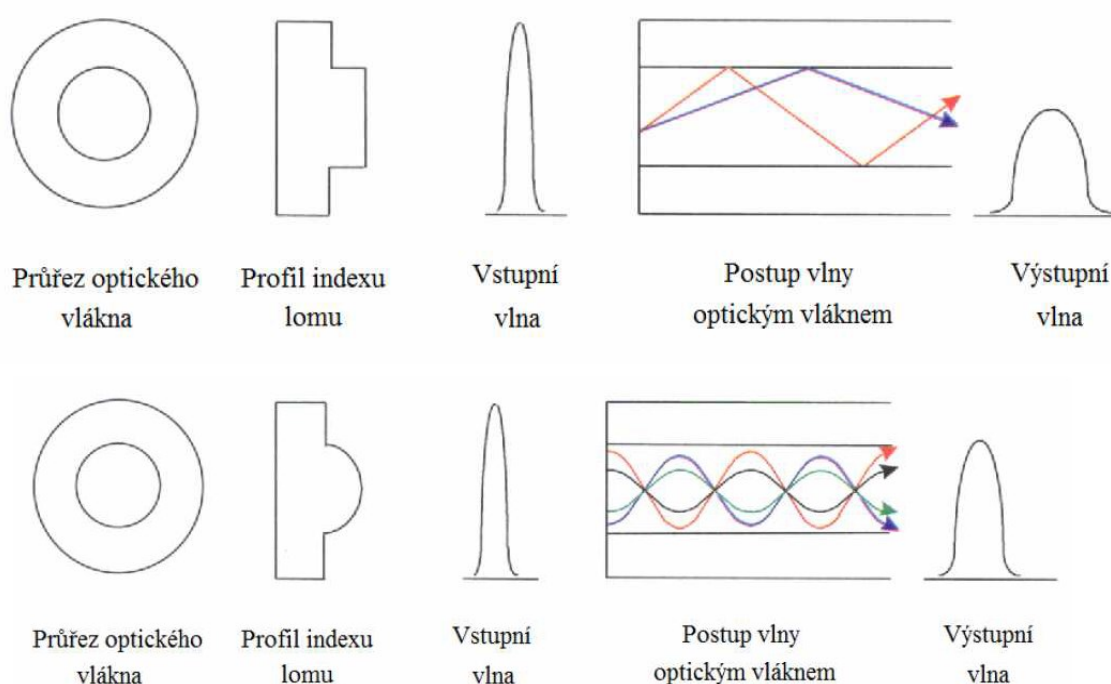
Optická vlákna slouží jako vlnovody, schopné přenášet elektromagnetické vlny o velmi vysokém kmitočtu. Řádově se jedná o stovky THz, což jsou světelné vlny. Jejich vlnová délka se pohybuje v rozmezí 0,1 mm až 10 nm. Skládají se z jádra a pláště, které mají rozdílné indexy lomu. Složení optického vlákna je znázorněno na obrázku 1.1. Jádro optického vlákna má nepatrně vyšší index lomu než plášť. Díky tomu dochází na rozhraní jádra a pláště k úplnému odrazu světla, což je také základní podmínkou při přenosu světla optickým vlnovodem. Optické vlnovody lze zkráceně označovat jako světlovody.

Základním konstrukčním materiálem optických vláken je křemenné sklo vysoké čistoty (SiO_2), které může obsahovat další příměsi, jako jsou germanium, fosfor, fluor. Tato směs je následně roztavena a tažením upravena do podoby optického vlákna. Díky materiálovým vlastnostem optických vláken došlo k vymezení přenosových oken, tedy oblastí s vhodnými parametry pro přenos informací. Jedná se o okolí vlnových délek 850, 1310, 1550 nm.



Obrázek 1.1: Složení optického vlákna

První optická vlákna patřila do skupiny multi-módových vláken, která přenášejí více módů (vidů) světla. Tato vlastnost je dána geometrickými rozměry vlnovodu. Průměr jádra běžných multi-módových vláken (dále jen MM) je 50 μm nebo 62,5 μm . Průměr pláště je 125 μm . U MM vláken se pracuje s vlnovými délkami 850 a 1300 nm. Tento typ vláken se používá převážně v LAN sítích, kde jsou délky tras optických sítí v řádech kilometrů. Nevýhodou tohoto typu optického vlnovodu je projevující se módová disperze, která způsobuje roztažení optického pulzu. Jelikož se informace přenáší souborem vidů, které postupují optickým vláknem po různě dlouhých trasách, dochází k různé době šíření těchto vidů. Módová disperze se nejvíce projevuje u vláken se skokovou změnou indexu lomu.



Obrázek 1.2: Vliv módové disperze na MM-SI a MM-GI

Módová disperze lze částečně eliminovat použitím optických vláken s gradientní změnou indexu lomu. Po úpravě vlastností vlákna je v ose jádra opticky nejhustší materiál. Tím pádem jsou osově přenášené vidy nejpomalejší a naopak vidy u okraje jádra nejrychlejší. Princip je názorně předveden na obrázku 1.2.

Další možností eliminace módové disperze je použití single-módových (dále jen SM) vláken, které jsou charakteristické přenosem pouze jednoho světelného módu. Tato vlastnost je dána geometrickými rozměry jádra vlákna, které má průměr 8-10 μm . Příslušnost vlákna do skupiny MM nebo SM vláken určuje normalizovaná frekvence neboli V-number. Výpočet se provádí vzorcem 1.1.

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} NA \quad (1.1)$$

Pokud je vlákno jednomódové, hodnota V musí být menší nebo rovna 2,405. Parametr NA označuje numerickou aperturu, která určuje úhel, pod kterým lze módy navázat do vlákna. Za λ se dosazuje použitá vlnová délka přenášeného světelného záření. Hodnota r znamená průměr jádra vlákna.

Jednomódová vlákna už netrpí módovou disperzí, jsou však limitována jinými druhy disperzí. Projevuje se u nich disperze chromatická, která je způsobena nestejnými rychlostmi šíření spektrálních složek téhož vidu. V dnešní době se dá velice dobře kompenzovat vlnovodnou disperzí, která je vždy záporná. Pokud bude hodnota chromatické a vlnovodné disperze stejná, navzájem se eliminují.

Poslední projevující se disperzí je polarizačně módová, která je způsobena rozdílnými dobami šíření různě polarizovaných složek světla. Jedinou možností, kterou lze vliv této disperze částečně eliminovat, je použití speciálních polarizací zachovávajících optických vláken. Této možnosti se v dnešní době příliš nepoužívá z důvodu komplikací při výrobě zmíněných vláken. Problematické je také svařování těchto optických vláken.

Další typ optických vláken se liší v použitém konstrukčním materiálu. Nejsou vyrobená z křemenného skla, ale z plastu. Obvykle se jedná o PMMA (Polymethylmetakrylát) nebo polystyren pro jádro vlákna, plášť je tvořen polymery s příměsí fluoru. Plastová optická vlákna (POF) jsou odlišná také svými rozměry, průměr vlákna bývá 1000 μm a jádro tvoří až 980 μm . POF se nepoužívají v telekomunikacích, jelikož mají velmi vysoký útlum na kilometr vlákna. Řádově se jedná o útlum $10^0 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Přesto však nacházejí své využití například v automobilovém průmyslu, kde se používají k osvětlení kontrolky. Díky svým rozměrům nejsou tak citlivá na nepřesnosti v konektorových spojkách. Tím pádem je použití plastových optických vláken ekonomicky výhodnější. Samozřejmě pouze v případě, kdy lze akceptovat zhoršené přenosové vlastnosti. Díky odolnosti proti vibracím a ohybům se dnes tyto vlákna používají také ve vlacích a automobilech, kde tvoří přenosové médium vnitřních sítí vozidel.

1.2 Zdroje optického záření

Prvním ze zdrojů optického záření používaných v optických komunikacích jsou LED (Light Emitting Diode) diody, což jsou polovodičové součástky využívající zářivých rekombinací na přechodu PN. Rekombinace jsou spontánní, proto dochází k samovolné emisi světla s následujícími vlastnostmi.

- Přechody elektronů a děr probíhají mezi širokým rozsahem energetických stavů, důsledkem je velká spektrální šířka (60 nm pro $\lambda=850 \text{ nm}$, 180 nm pro $\lambda=1300 \text{ nm}$).
- Fotony jsou emitovány různými směry. Tok fotonů se obtížně řídí. Důsledkem je malá účinnost přeměny.

- Fotony se na výstupu z PN přechodu šíří všemi směry, čímž je dáno všesměrové chování zdroje.
- Jednotlivé rekombinace elektronů nejsou synchronizovány v čase. Důsledkem je vznik nekoherentního světla (světla bez fázové souvislosti).

LD (Laser Diode) vznikly v roce 1975. Jejich základními vlastnostmi jsou vysoký jas, úzká spektrální čára, koherence světla. Slouží jako zdroje pro dlouhé přenosové trasy s velkou přenosovou rychlostí. Lasery využívají stimulované emise, což znamená, že emise světla probíhá na základě vnějšího popudu (stimulu).

- Na počátku je emitován samovolný foton, který pro excitované elektrony představuje stimulující popud. Nově vzniklé fotony mají identické vlastnosti jako stimulační foton.
- Fotony se šíří ve stejném směru, důsledkem je zvýšená účinnost přeměny.
- Stejný směr šíření fotonů způsobuje směrovost výstupního svazku. Ten lze snadno fokusovat.
- Zářivé rekombinace jsou synchronizovány v čase. Vzniklé světlo je koherentní.

Nezbytnou podmínkou činnosti laseru je inverze populace. Dochází k ní v případě, kdy je více atomů v metastabilní energetické hladině (s vyšší energií) než na základní hladině.

Buzení laseru v telekomunikacích bývá řešeno průchodem elektrického proudu, který přemístí elektrony do vyšší energetické hladiny. Ty poté sestoupí do metastabilní hladiny. V této hladině setrvávají určitý čas, během kterého dojde k interakci se stimulačním fotonem. Elektron následně sestoupí do základní hladiny a zároveň vyžáří foton se stejnými vlastnostmi jako stimulační foton.

1.3 Detektory optického záření

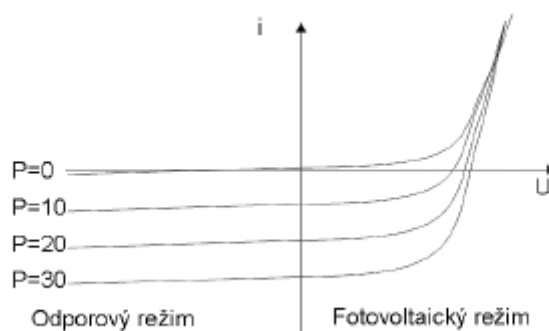
Světlo, které prochází optickým vláknem a dopadá na detektor, musí být převedeno na elektrický signál, aby jej elektronické obvody dokázaly zpracovat.

Požadavky na detektor:

- Velká citlivost v oblasti pracovních vlnových délek.
- Vysoký stupeň věrnosti při konverzi signálu.
- Velká elektrická odezva na malý vstupní signál.
- Velmi krátká doba odezvy pro získání co největší šířky pásma.
- Minimální šum generovaný fotodetektorem.
- Časová, teplotní stabilita převodních charakteristik.

V optických komunikacích se pracuje s vlnovými délkami $0,8 - 2 \text{ } \mu\text{m}$. Lze používat dva pracovní principy: vnitřní a vnější fotoefekt. Vnější fotoefekt využívá ke své činnosti fotonásobiče a vakuové fotony, které se v současnosti nepoužívají pro svou velikost a velké závěrné napětí.

Vnitřní fotoefekt je nejpoužívanější funkční princip fotodetektorů. Nevýhodou je vlastní absorpce materiálu, protože celý děj probíhá uvnitř krystalu. Výhodou je jeho rychlost. Princip funkce je následující: foton dopadá na PN přechod, narazí do elektronu ve valenční vrstvě a předá mu svou energii. Elektron absorbuje tuto energii, což mu umožní přechod z valenčního pásu do vodivostního pásu. Při přechodu elektron opustí vlastní atom a pohybuje se prostorem krystalové mřížky. Tímto procesem vznikl jeden volný elektron a jedna díra. Tyto volné elektrony působí jako volné nosiče náboje, které snižují elektrický odpor polovodiče. Fotodioda je plošná polovodičová součástka konstrukčně upravená tak, aby do oblasti PN přechodu pronikalo světlo. Má dva pracovní režimy. Fotovoltaický je „pasivní“ režim, dioda nepotřebuje závěrné předpětí. V telekomunikacích se nepoužívá. Naopak fotovodivostní režim se telekomunikacích používá. Dioda pracuje ve 3. kvadrantu VA charakteristiky, které je na obrázku 1.3. Je charakteristický větší oblastí prostorového náboje, menší kapacitou přechodu, rychlejším pohybem nosičů náboje a lineární odezvou. Tento režim je v obrázku označen jako odporový. Nutno podotknout, že vliv osvětlení přechodu může být sledován pouze při polarizaci diody závěrným napětím. Reakční doba fotodiody je 10^{-6} až 10^{-9} sekundy.



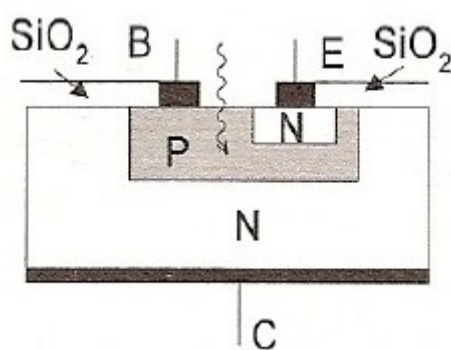
Obrázek 1.3: Volt-Ampérová charakteristika fotodiody

PIN fotodioda vznikne přidáním vrstvy minimálně dotovaného polovodiče, která se vloží mezi vrstvy P a N. Pracuje se zde s mnohem vyššími intenzitami elektrického pole v oblasti PN přechodu. Tím je dosaženo rychlejšího náběhu v řádu 10^{-12} až 10^{-15} sekundy.

Pokud nedostačuje citlivost zmíněných fotodiod, je možné použít lavinovou fotodiodu, která vykazuje vlastní zesílení. Toto zesílení fotoproudu je způsobeno přiložením velkého závěrného napětí, které urychluje vzniklé nosiče náboje natolik, že při srážce s mřížkou krystalu polovodiče dojde k vyražení dalších (sekundárních) elektronů. Výhoda vlastního zesílení je vykoupena náročnější

konstrukcí fotodiody a nutností polarizace diody. K tomu je zapotřebí kvalitní stabilizovaný zdroj napětí (Ge asi 30 V, Si 300 V), přičemž potřebná hodnota napětí je pro každou diodu (i ze stejného materiálu) různá.

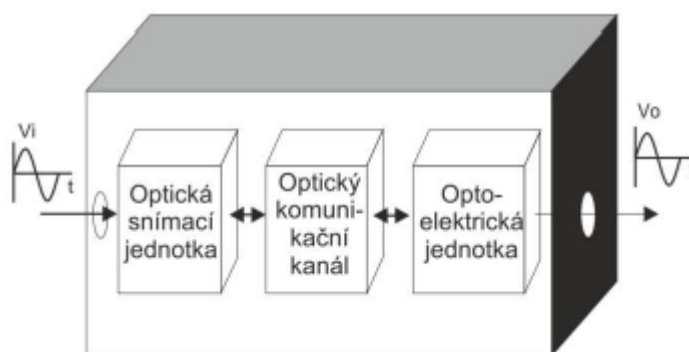
Fototranzistor umožňuje řízení průchodu nosičů náboje pomocí intenzity dopadajícího optického záření. Úpravou vnitřního uspořádání fototranzistoru dochází k pohlcování optického záření v bázi tranzistoru. Tím jsou generovány páry elektron – díra, které jsou oddělovány kolektorovým a emitorovým přechodem. Taktéž dochází ke změně potenciálu kolektorového a emitorového přechodu. Díky polarizaci emitorového přechodu v propustném směru způsobuje změna jeho napětí poměrně větší změnu kolektorového proudu, tak jako u klasického bipolárního tranzistoru. Struktura NPN fototranzistoru s vyvedenou bází je na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Vnitřní struktura fototranzistoru [6]

1.4 Vláknavě optické senzory

Vláknavě optické senzory jsou systémy sloužící k měření většiny fyzikálních veličin. Skládají se ze snímacího zařízení, komunikačního kanálu a subsystému generujícího, detekujícího, zpracovávajícího a upravujícího signál, viz obrázek 1.5. Optický senzor je obecně systém, v němž dochází k modulaci některé z charakteristik světla. Měřená veličina tedy může modulovat frekvenční, amplitudovou, fázovou nebo polarizační charakteristiku světla[7].



Obrázek 1.5: Blokové schéma obecného optického senzoru

Mezi výhody vláknově optických senzorů patří jejich malá hmotnost, malé rozměry, odolnost proti elektromagnetickému a elektrostatickému rušení, vysoká citlivost. Velmi důležitá je také elektrická nevodivost těchto senzorů, odolnost proti vlivům prostředí a vysokým teplotám

Existuje mnoho hledisek, podle kterých lze senzory rozdělit do skupin.

Dělení dle povahy přeměny převodu veličiny[7]

Rozdělení na intrinzní a extrinzní senzory závisí na místě, ve kterém je světlo ovlivňováno měřenou veličinou. Pokud k modulaci dochází uvnitř optického vlákna, jedná se o intrinzní senzory, mezi které lze zařadit například senzory využívající Braggovy mřížky.

Extrinzní senzory naopak pracují s modulátory, které mění vlastnosti světla mimo optické vlákno. Modulátorem může být například odrazná plocha, pružné uchycení vláken proti sobě a další.

Dělení dle modulace měřené veličiny[7]

Amplitudové senzory detekují měřenou veličinu pomocí změny amplitudy přenášeného světla. Výhodou těchto senzorů je možnost použití koherentních i nekoherentních zdrojů společně s jednoduchými optickými součástkami, díky kterým je tento typ senzorů levný a často používaný.

Fázové senzory získávají informace o měřené veličině z údajů o změně fáze světelného záření. Tyto senzory vyžadují použití koherentních zdrojů záření, složitých zařízení pro kontrolu polarizace, jednomódových optických vláken a někdy i polarizaci zachovávajících vláken. Tím pádem jsou pořizovací náklady těchto senzorů značně vysoké.

Další skupinou jsou spektroskopické senzory, ve kterých měřený předmět moduluje spektrum optického záření. Posledním druhem jsou senzory polarimetrické, kde dochází k modulaci polarizace světla měřenou veličinou.

Dělení dle prostorového rozložení měřené veličiny[7]

Bodové senzory umožňují měření veličiny pouze v jednom určitém místě. Tyto senzory jsou nejrozšířenější. U integrovaných senzorů dochází k integraci měřené veličiny ze všech proměnných hodnot, které ve výsledku tvoří jedinou hodnotu výsledku.

Distribuované senzory jsou schopny detekovat v prostoru. Umožňují sledovat měřenou veličinu podél trasy celého optického vlákna. Nejčastěji se používají k sledování teploty pomocí nelineárních jevů. Kvazi-distribuované senzory stojí na pomezí bodových a distribuovaných senzorů. Umožňují sledování měřené veličiny ve více místech, které však jsou předem definovány. V těchto měřicích místech jsou optická vlákna citlivá na měřenou veličinu.

Dělení dle oboru použití a měřené veličiny[7]

Mechanické senzory jsou širokou skupinou zastřešující měření rychlosti, zrychlení, síly, tlaku, vibrací a dalších veličin. K měření jsou využívány otřesy, paprsky či membrány, kontaktní nebo bezkontaktní metody.

Teplotní senzory pracují se závislostí emisního spektra na absorpci, indexu lomu, přenosových parametrech, periodě difrakční mřížky a nelineárních jevech.

Senzory elektromagnetické jsou schopny měřit elektrický proud, elektrické pole a magnetické pole. Pro měření se využívá elektro-optických, magneto-optických a Faradayových jevů.

Radiační senzory pracují s luminiscencí a florescencí, díky kterým umožňují měření rentgenových paprsků a jaderného záření.

Senzory chemického složení využívají k detekci chemických složek změnu světelného záření, která je způsobena absorpcí nebo florescencí.

Měření toku a vířivosti kapalin používají k měření principu disperze a absorpce, která je vyprovokována na značkových částicích.

Poslední skupinou jsou senzory biomedicínských veličin, což je například kyselost, obsah kyslíku nebo oxidu uhličitého. Pro měření se opět využívá principů absorpce a luminiscence.

1.5 Intenzitní senzory

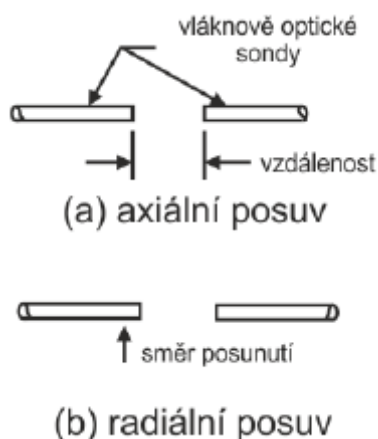
Intenzitní senzory detekují měřenou fyzikální veličinu na základě změny intenzity světla, které je vedeno prostředím citlivým na požadovanou fyzikální veličinu. K modulaci intenzity světla může dojít na základě jeho přenosu, odrazu a vyvážení způsobeného mikroohyby.

Krom těchto vlivů lze intenzitu světla modulovat také pomocí dalších jevů, kterými jsou: absorpce, rozptyl, fluorescence, polarizace. Taktéž je možné použití optických mřížek.

Přenosový koncept

Senzory založené na přenosovém konceptu jsou běžně spojovány s přerušením optického svazku. Díky tomu slouží jako optické spínače, které mají dva možné stavy. V jednom stavu senzor propouští světlo, ve druhém stavu jej nepropouští.

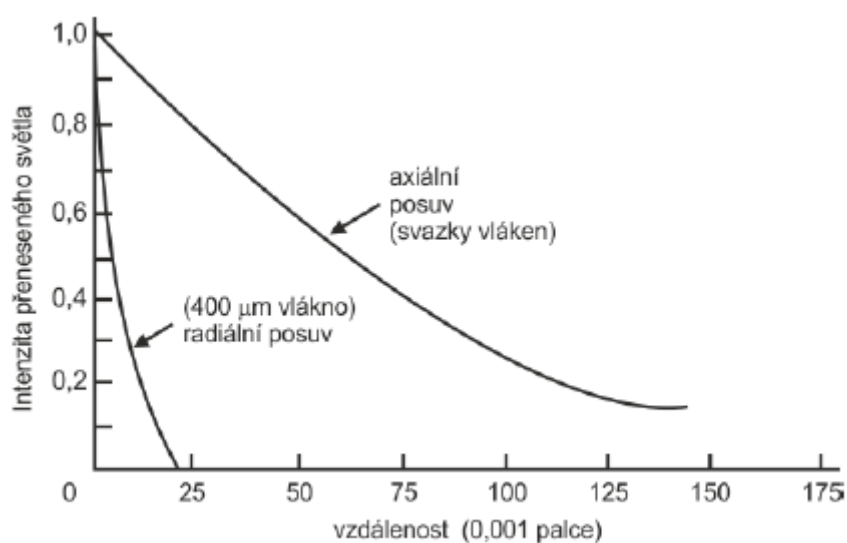
Pokud nebudou brány v úvahu pouze dva mezní stavy, ale postupné změny intenzity přeneseného světla, mohou plnit funkci kvalitních analogových senzorů. Na obrázku 1.6 jsou znázorněny dva typy senzorů, využívajících posunu optických vláken.



Obrázek 1.6: Intenzitní senzory [7]

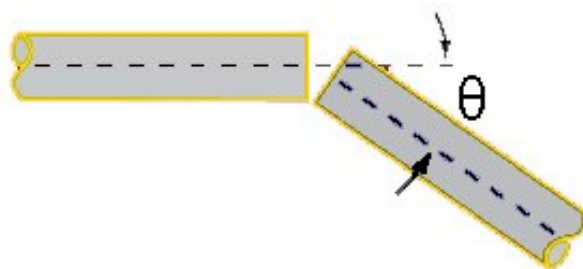
Axiální posuv moduluje intenzitu přeneseného světla v závislosti na vzdálenosti, která vznikla mezi čely optických vláken. Na obrázku 1.7 jsou vykresleny křivky, popisující závislosti intenzity přeneseného světla na posunech vláken. Křivka závislosti axiálního posunu je tvořena obrácenou hodnotou druhé mocniny vzdálenosti mezi čely vláken.

Pro získání větší citlivosti je využito radiálního posunu, při kterém dochází k narušení souososti optických vláken. Při posunutí os vláken o vzdálenost větší než průměr vlákna dochází k poklesu intenzity přeneseného světla na nulovou úroveň. Tato skutečnost je patrná z obrázku 1.7, kde je vykreslena závislost intenzity přeneseného světla na radiálním posunu čel vláken. Průměru vlákna 400 μm odpovídá 0,016 palce. Z grafu je patrné, že při tomto posunutí je intenzita světla nulová.



Obrázek 1.7: Závislost intenzity přeneseného světla na posuvu vláken [7]

Krom posunu čel optických vláken může docházet také k situaci, kdy se mění úhel, který čela svírají. Tím pádem dojde k úhlovému ofsetu, který je znázorněn na obrázku 1.8. Pokud jsou vlákna namířena proti sobě, svírají úhel $\theta = 0^\circ$ a optické záření z čela výstupního vlákna míří přímo na čelo vstupního vlákna. Pokud dojde ke změně úhlu vláken, změní se množství navázaného světla a tím rovněž intenzita na výstupu senzoru. Velikost navázaného světla závisí na mnoha faktorech, jako je velikost vstupního úhlu, čistota čel a dalších.



Obrázek 1.8: Úhlový ofset vláken

1.6 Tenzometry a intenzitní senzory

Tenzometry jsou senzory sloužící k nepřímému měření mechanického napětí na povrchu součásti prostřednictvím měření její deformace

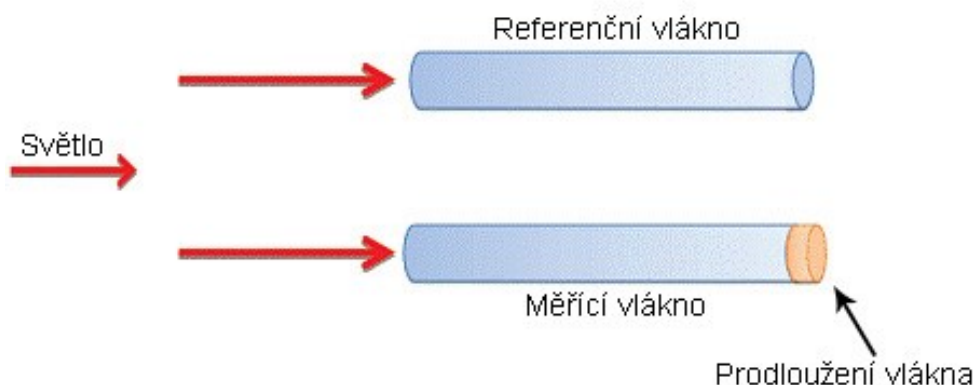
Optické tenzometry lze rozdělit do několika skupin na základě modulované veličiny světla. První skupinou jsou intenzitní tenzometry, které mění intenzitu procházejícího světelného záření. Změny intenzity jsou způsobeny působením vnějšího prostředí, což může být působení tlaku na optické vlákno, přerušení vlákna, axiální či radiální posun čel optických vláken.

Dalšími skupinami jsou tenzometry modulující vlnovou délku nebo fázi světla. Principy těchto snímačů jsou odvozeny od různých typů interferometrů, kterými jsou například Fabry-Perotův, Michelsonův atd.

Interferometrické snímače se dvěma optickými vlákny

Tento typ snímačů je odvozen od Michelsonova interferometru, jenž je realizován pomocí dvou optických vláken. Podmínkou těchto interferometrů je použití monochromatického světelného zdroje, jehož záření je rozděleno do dvou svazků, majících stejnou vlnovou délku a počáteční fázi. Délka přívodních optických vláken vedoucích svazky musí být stejná, záření musí procházet v obou vláknech identickými optickými prvky. Referenční optické vlákno musí být chráněno proti vlivu měřené veličiny, kdežto měřící vlákno musí být vystaveno vlivu měřené veličiny. Princip je na obrázku 1.9. Pokud na vlákna působí další vnější vlivy, které nemají být předmětem měření (např. okolní teplota), je vhodné zajistit stejné působení tohoto vlivu na obě vlákna. Pokud je působení vnějších vlivů na vlákna identické, jejich vliv se eliminuje.

Po odrazech na koncích vlákna dojde ke spojení optických svazků záření do jednoho svazku, ve kterém dochází k interferenci projevující se vznikem interferenčních proužků na stínítku detektoru. Toto měřicí uspořádání je vhodné pro snímače s velkou délkou měřicího vlákna [1].



Obrázek 1.9: Tenzometr na bázi Michelsonova interferometru

Tento typ tenzometru bývá použit při měření pnutí betonových nosníků, betonových konstrukcí a dalších.

Snímače na bázi Fabry-Perotova interferometru [9]

Na základě tohoto typu interferometru jsou postaveny miniaturní snímače deformace. Senzor je složen ze dvou paralelních zrcadel vytvořených v optickém vlákně, která jsou oddělena dutinou. Návrh senzoru je na obrázku 1.10. V extrinzní konfiguraci jsou tyto dvě zrcadlové plochy odděleny vzduchovou dutinou. Část záření prochází oběma zrcadly, část záření se odrazí zpět. Frekvenční složky odraženého záření odpovídají frekvenci módů dutiny mezi zrcadly. Působením vnějšího prostředí dochází ke změně délky dutiny, čímž jsou ovlivněny vlnové délky odraženého světla. Tyto změny vlnové délky mohou být detekovány vhodnými interferometry.



Obrázek 1.10: Tenzometr na principu Fabry-Perotova interferometru [9]

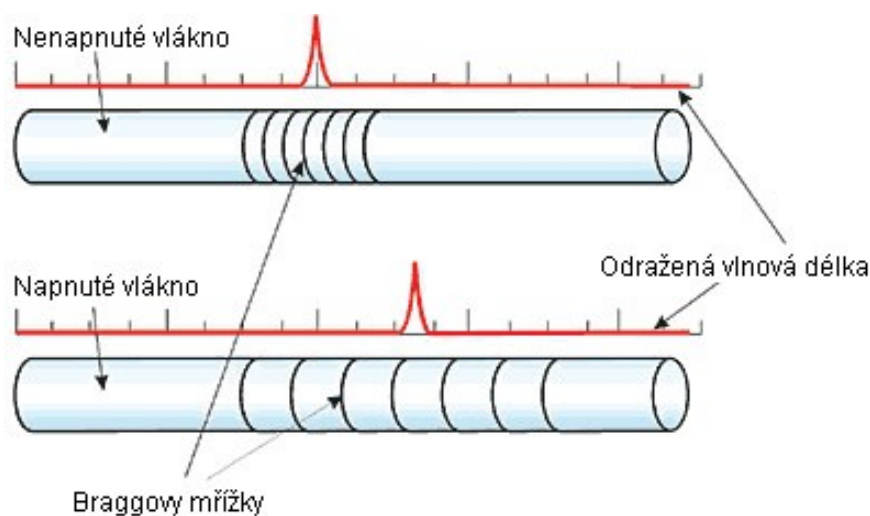
U intrinzičního typu senzoru jsou zrcadla rozdělena jednomódovým optickým vláknem.

Výhodou tohoto typu interferometru je absence druhého referenčního vlákna. K referenci je použita první část optického vlákna ohraničená první odraznou plochou.

Snímače s Braggovou mřížkou

Braggova mřížka je krátký úsek optického vlákna, v němž dochází k periodickým změnám indexu lomu ve směru osy vlákna. Tato mřížka se chová jako selektivní zrcadlo, které odráží pouze záření v okolí určité vlnové délky. Záření jiných vlnových délek prochází Braggovou mřížkou téměř beze ztrát. Selektivnost mřížky závisí hlavně na její délce.

Pokud na mřížku působí vlivy vnějšího prostředí, kterými může být deformace nebo teplota, dochází ke změně vzdálenosti mezi změnami indexu lomu v mřížce. Tím je změněna odražená vlnová délka záření. Princip funkce je znázorněn na obrázku 1.11. Změny vlnové délky mohou být detekovány některými typy interferometrů nebo spektrálním analyzátozem světla.



Obrázek 1.11: *Princip tenzometru na FBG principu [8]*

Stejně jako u snímačů na bázi Fabry-Perotova interferometru, i zde je použito pouze jedno optické vlákno. Po potřeby reference slouží první část vlákna až po první odraznou plochu. Další výhodou je možnost použití více mřížek nastavených na různé vlnové délky. Pokud jsou tyto mřížky navařeny k optickému vláknu, lze jedním optickým vláknem měřit více hodnot zároveň.

1.7 Rozbor citlivosti SM, MM a POF vláken

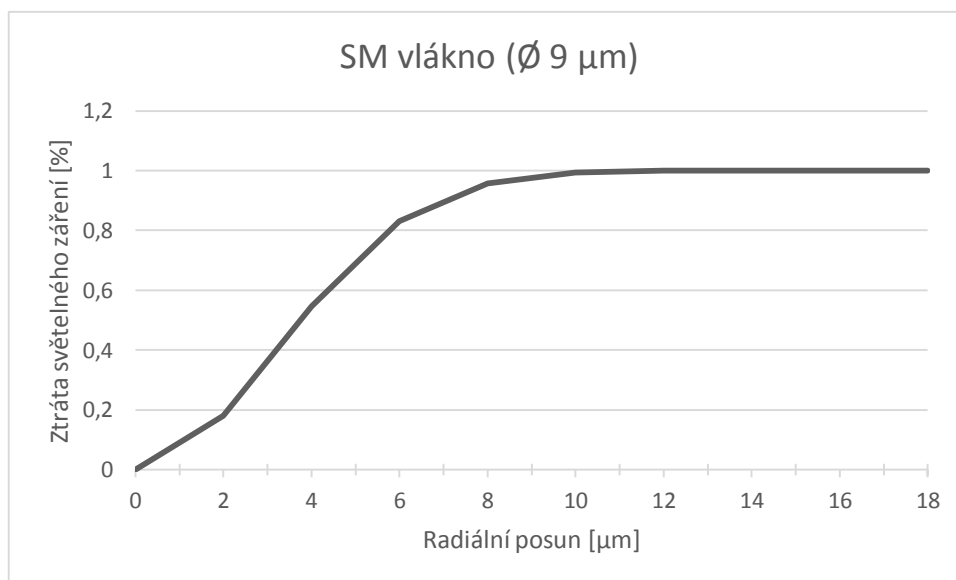
Citlivost vláknového optického tenzometru lze krom jiných způsobů ovlivnit také použitým typem optického vlákna. Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.1, existují tři základní typy optických vláken, které se liší geometrickými rozměry jádra vlákna, viz tabulka 1.1. Čím menší průměr jádra optického vlákna bude, tím menší výchylka jazýčku tenzometru stačí ke změně intenzity přeneseného světla.

Tabulka 1.1: *Druhy optických vláken a jejich rozměry*

TYP VLÁKNA	Ø JÁDRA VLÁKNA [MM]
SINGLE-MODE	8 – 10
MULTI-MODE	50 – 62,5
PLASTIC OPTIC FIBER	800 – 1000

Ztráta optického výkonu způsobená radiálním posunem byla počítána pomocí vzorce 1.2 získaného z literatury [15]. Hodnota X značí velikost radiálního posunu, ω_0 znamená průměr vidového pole. Hodnota průměru vidového pole je přibližně rovna průměru jádra optického vlákna.

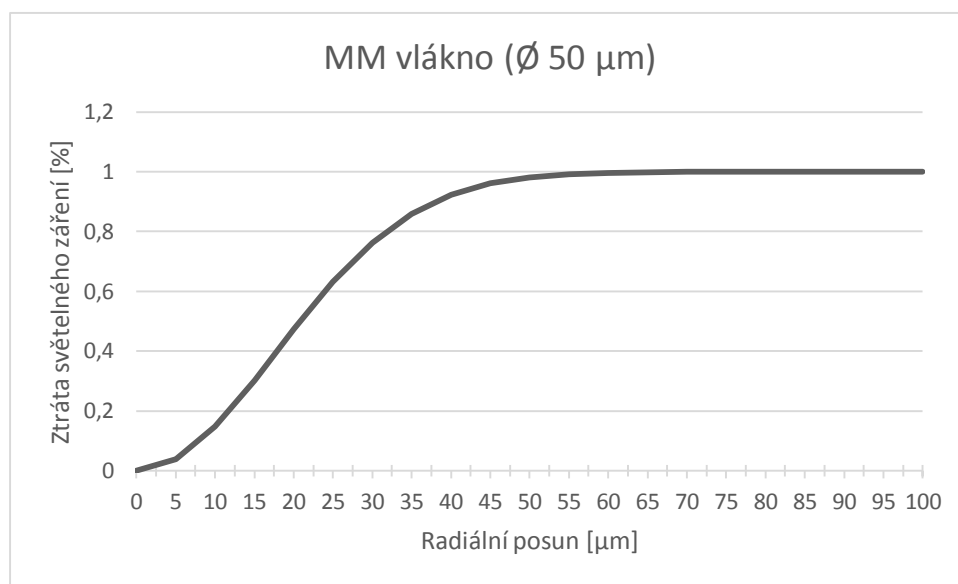
$$Ztráta = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\omega_0}\right)^2} [\%] \quad (1.2)$$



Obrázek 1.12: *Závislost ztráty světla na radiálním posunu (SM vlákno)*

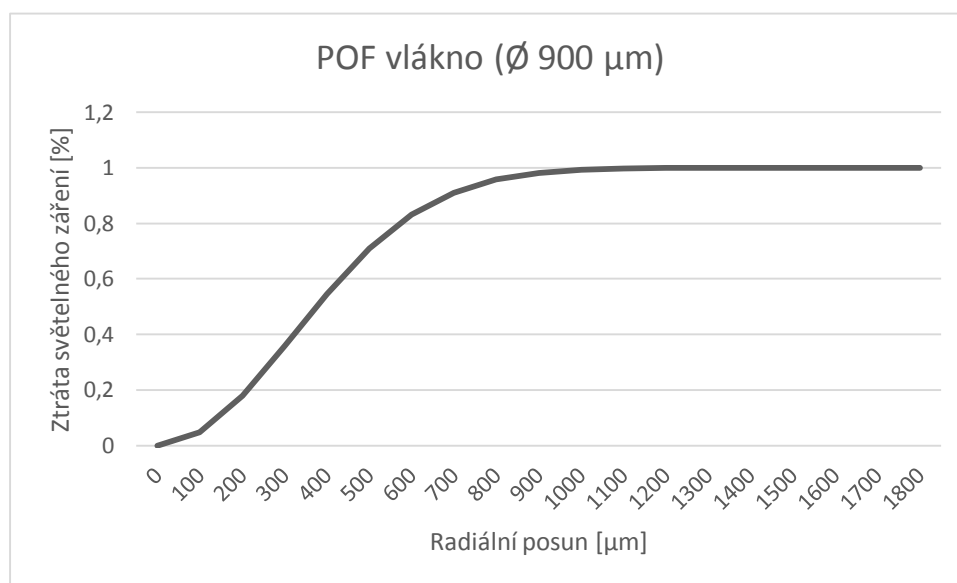
Obsahem obrázku 1.12 je graf zobrazující závislost ztráty světelného záření v závislosti na radiálním posunu čel optických vláken. Jedná se o graf odpovídající SM vláknům s průměrem jádra 9 μm . Při posunu o vzdálenost větší než je průměr jádra vlákna dochází k téměř stoprocentní ztrátě optického výkonu.

Graf na obrázku 1.13 popisuje závislost ztráty světelného záření v závislosti na radiálním posunu multimódových optických vláken. Průměr jádra vlákna byl 50 μm .



Obrázek 1.13: *Závislost ztráty světla na radiálním posunu (MM vlákno)*

Obrázek 1.14 popisuje závislost ztráty světla při použití plastových optických vláken, která mají průměr jádra vlákna 900 μm .



Obrázek 1.14: Závislost ztráty světla na radiálním posunu (POF vlákno)

Z grafů je zřejmé, že čím menší je průměr jádra použitého vlákna, tím větší bude citlivost vláknového optického tenzometru. Při použití SM vláken způsobí výchylka o 9 µm téměř kompletní ztrátu přenášeného světelného záření. Optický tenzometr by tedy musel být postaven s přesností v řádu nanometrů. Je zřejmé, že takovýto požadavek na preciznost výroby by nepříznivě ovlivnil náklady na výrobu senzoru. Zároveň by byl tenzometr velice choulostivý na zacházení a během nárazů vozidla by mohl být velice snadno poškozen. Tím by nebylo možno opakovat měření. Z těchto důvodů nebyly při konstrukci tenzometru použity SM vlákna.

V případě použití MM vláken, jejichž průměr jádra je 50 – 62,5 µm je citlivost tenzometru menší než v případě SM vláken. I přesto je tenzometr stále velice citlivý a tím pádem jsou kladeny velké požadavky na přesnost výroby. Proto nebyly ani MM vlákna použity při výrobě.

Nejvhodnějšími optickými vlákny pro výrobu tenzometru jsou vlákna plastová, jelikož kladou nejmenší požadavky na preciznost výroby a zároveň jsou dostatečně citlivé. Lze s nimi měřit průběhy působení mechanického napětí během nárazu vozidla do pevné překážky. Proto byla při výrobě tenzometru použita právě tato optická vlákna.

2 Měřicí soustava

Kapitola se zabývá návrhem a stavbou měřicí soustavy, se kterou byly zaznamenávána data popisující náraz vozidla. Jsou zde popsány kritéria výběru vhodného modelu, dále teorie a principy dle kterých byla měřicí soustava vyráběna.

2.1 Model vozidla

Před započítím samotného měření bylo nutné vybrat model vozidla, pomocí kterého by se provádělo měření s vláknovým optickým tenzometrem. Zpočátku se počítalo spíše s upraveným vozíkem, který by byl manuálně uveden do pohybu, a následně by s ním bylo naraženo do překážky. Druhou variantou byl dálkově řízený model vozidla, jenž by byl nutné dovybavit vhodnou nosnou nástavbou, která by složila jako nosič optického tenzometru dalších nutných komponentů.

I přes očekávané komplikace způsobené výrobou nástavby bylo rozhodnuto ve prospěch dálkově řízeného modelu. Rozhodnutí bylo z velké části podloženo podobností se skutečnými vozidly a tím pádem byly očekávány přesnější a adekvátnější data.



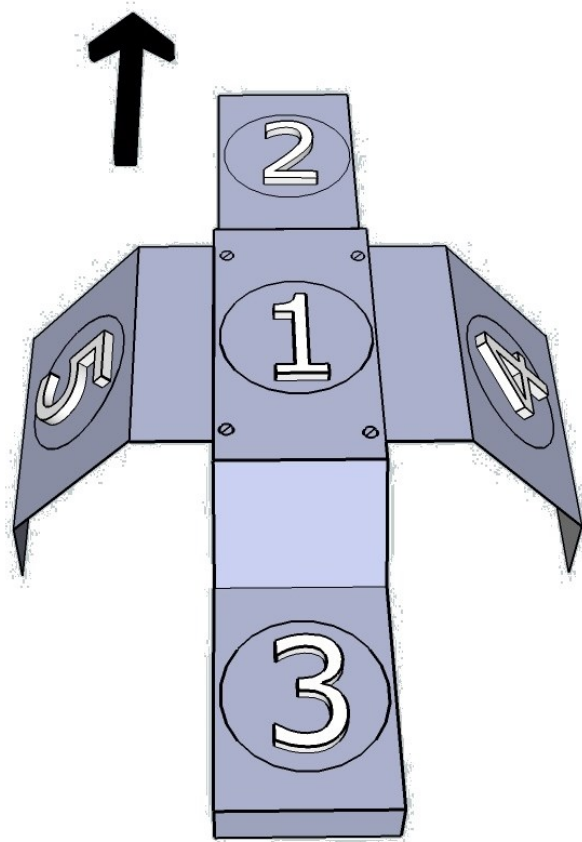
Obrázek 2.1: Použitý model vozidla [3]

Zakoupený model je v měřítku 1:10 a je vybavený střídavým elektromotorem. Využití elektrického pohonu vozidla bylo podmíněno hlavně menšími vibracemi, vznikající chodem motoru. V případě použití spalovacího motoru byly očekávány mnohem větší vibrace, které by mohly při nízké váze a velikosti modelu značně ovlivnit získaná data.

Mezi další kritéria výběru modelu patří tvar karoserie vozidla a její uchycení k rámu modelu. Pro dosažení co nepřesnější výsledků bylo zapotřebí pevného spojení s rámem vozu, které přenesou sílu vzniklou při nárazu k optickému tenzometru. Vybraný model je jako jeden z mála vybaven čtyřmi kotvicími body, kterými je karoserie uchycena. Karoserie má rovněž jednoduchý tvar, který mírně usnadnil výrobu kovové nástavby.

Původně byla karoserie uchycena pomocí pružných pojistných závlaček. Pro připevnění nástavby nebyl tento systém ideální, jelikož byl požadován co nejpevnější spoj. Proto byl upraven rám vozu, kde byly původní plastové nosiče s otvory na pojistnou závlačku nahrazeny šrouby. Díky této úpravě bylo docíleno potřebné pevnosti spoje a tím i požadovanému přenosu energie nárazu.

Pro konstrukci nástavby vozidla byl zvolen hliníkový plech tloušťky 0,8mm, který byl dostatečně pevný a zároveň vozidlo nezatěžoval zbytečnou hmotností. Nástavba se skládala ze dvou pásů o rozměrech 35x8 cm a 15x8 cm. Tyto pásy byly ve středu spojeny do tvaru kříže a ohnuty tak, aby kopírovaly tvar karoserie. K rámu vozidla byly uchyceny pomocí výše zmíněných šroubů. Zároveň byly připraveny měřicí pozice, ke kterým byl při pokusech připevněn měřicí prvek. Měřicí pozice jsou znázorněny na 3D modelu nástavby na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Vizualizace navržené nástavby s popisem měřících pozic

Zároveň bylo nutné připravit nárazníky, které ochrání vozidlo před poškozením během nárazů. Jako konstrukční materiál byl opět vybrán hliníkový plech tloušťky 0,8mm, který byl připevněn k rámu vozidla z přední i zadní strany.

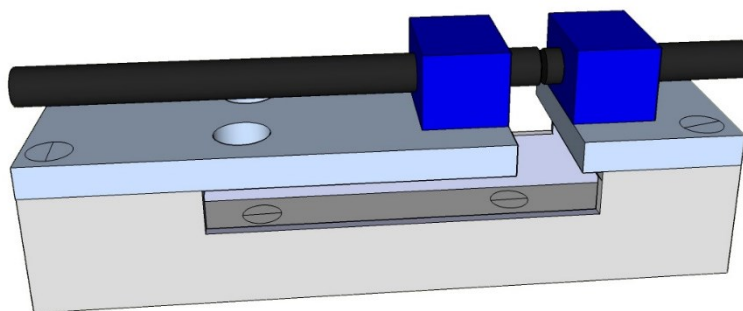
2.2 Optický tenzometr

Pro potřeby této práce byl navržen optický tenzometr, který lze zařadit do skupiny extrinzičních senzorů. K modulaci měřené veličiny dochází mimo optické vlákno. Z hlediska modulované veličiny se jedná o intenzitní senzor, jelikož působící mechanická deformace moduluje intenzitu přeneseného světla.

Základ optického tenzometru tvoří hliníkový profil o rozměrech 15x25x120 mm (VxŠxH), který byl upraven odstraněním části jedné stěny. Profil byl následně osazen plastovými pásy tloušťky 1,5 mm a rozměry 30x25 mm a 80x25 mm. K těmto pásům byly připevněny montážní konektory, do kterých byla následně uchycena plastová optická vlákna. Obrázek 2.3 obsahuje 3D model vyrobeného tenzometru.

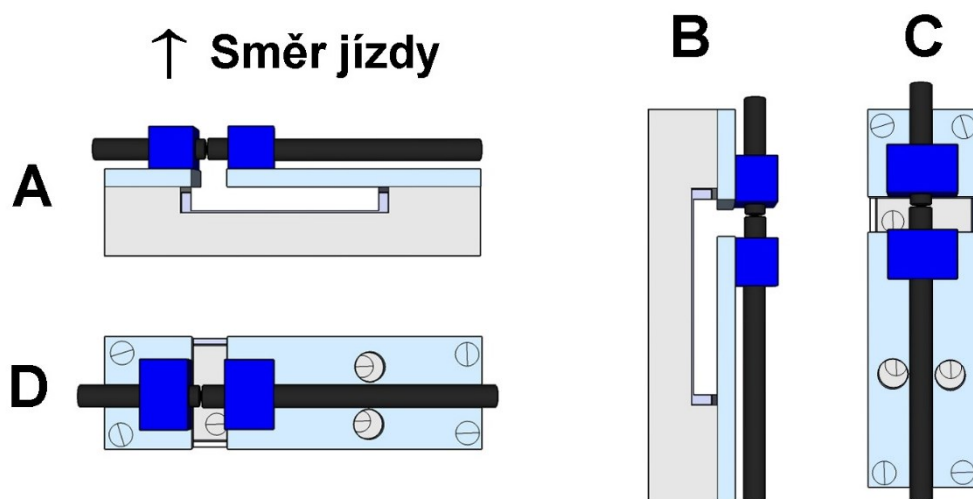
Konektory vznikly rozdělením SC-SC adaptérů, které jsou běžně používány v optických komunikacích. Jejich uchycení k pásům a uchycení konektorů bylo provedeno lepením.

Plastové pásy byly vyrobeny z plochého profilu, který je běžně dostupný v hobby marketech. Použitý výrobní materiál nebyl u výrobku specifikován a autorovi není znám.



Obrázek 2.3: Vizualizace navrženého tenzometru

Zadání této diplomové práce klade požadavek na měření při různých orientacích optického tenzometru. Na nástavbě vozidla byly připraveny měřící pozice, na které lze optický tenzometr přišroubovat. Aby bylo možné uložit tenzometr ve svislé rovině, byl připraven hliníkový profil tvaru „L“ o rozměrech stěny 25x120 mm. Profil bylo možné připevnit jednou stěnou k nástavbě vozu a druhá stěna byla navržena pro montáž tenzometru. Díky této úpravě lze optický tenzometr umístit na jednotlivé pozice ve čtyřech různých orientacích, které jsou náplní obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Možné orientace tenzometru na vozidle

Při použité orientaci A je tenzometr uložen na nástavbě ve svislé rovině a zároveň je kolmý ke směru jízdy vozidla. U varianty B jde o orientaci ve směru jízdy vozidla s kolmou orientací k zemskému povrchu. Případy C a D jsou analogické k předchozím dvěma orientacím, ale tenzometr je umístěn vodorovně s povrchem Země.

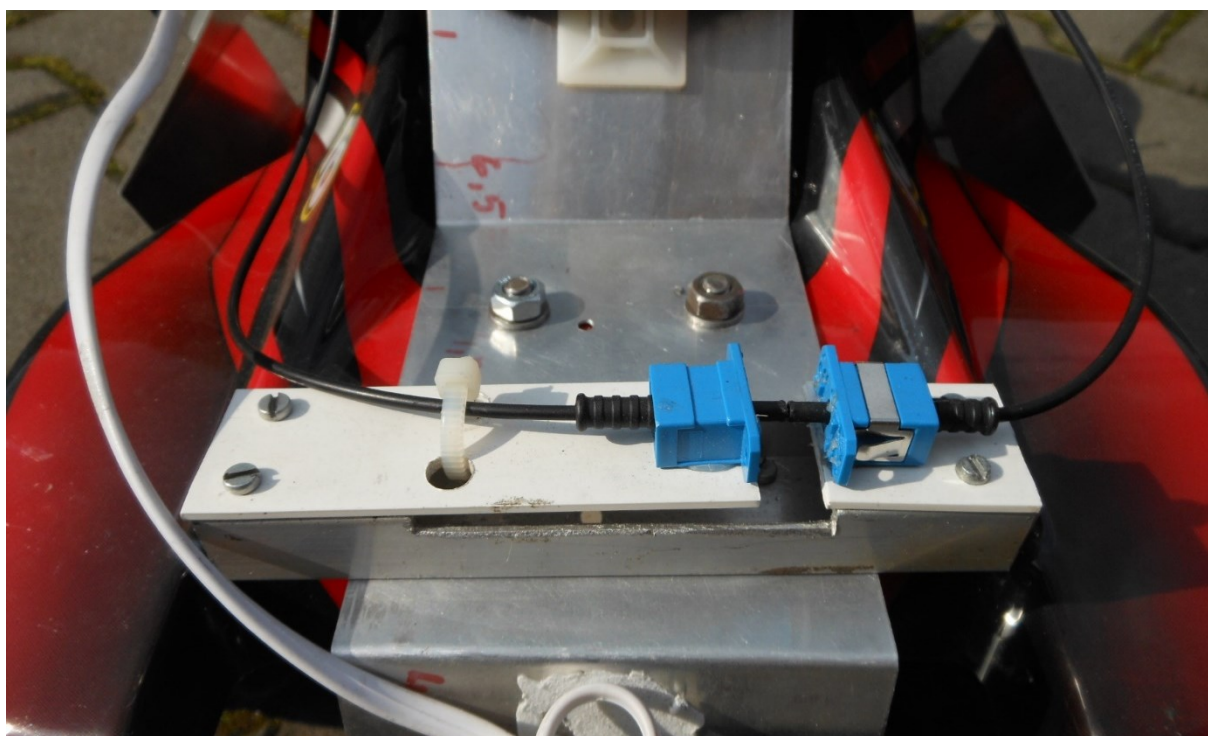
Při nárazu došlo k rozkmitání pružného plastového jazýčku, který svými kmity moduloval intenzitu přeneseného světla. Intenzita světla byla následně snímána detektorem záření. Intenzita přeneseného světla ovšem nebyla pro každou konfiguraci stejná, jelikož tenzometr nebyl vyroben s dílenskou přesností odpovídající použití optických vláken. Při použití plastových optických vláken, které mají rozměry jádra 800 – 1000 μm , je nutné pracovat s přesností vyrobených dílů řádu desetin milimetrů nebo méně. V této práci se jedná o experimentální výrobu tenzometru, čímž je dána i snížená preciznost výroby.

Citlivost tenzometru byla závislá na délce pružné části plastového jazýčku. Čím byla pružná část delší, tím větší mohly být dosažené výchylky. Další možností, kterou lze ovlivnit citlivost, je volba jiného materiálu jazýčku. Čím pružnější materiál bude použit, tím větší výchylka nastane při nárazu vozidla. V obou případech je nutné zvolit kompromis mezi požadovanou citlivostí a délkou jazýčku, protože jazýček nese optické vlákno včetně montážních konektorů. Vláknem a konektorem mají

určitou hmotnost, která zatěžuje jazýček a tím také způsobuje jeho výchylku. Pokud by byl použit příliš pružný materiál nebo příliš dlouhý jazýček, dojde působením hmotnosti optického vlákna a konektoru k takové výchylce, která způsobí pokles intenzity přeneseného světelného výkonu na nulovou úroveň.

Další možností změny citlivosti tenzometru je použití jiných typů optických vláken, která mají jiné geometrické rozměry jádra vlákna. Více o vlivu průměru jádra na intenzitu přeneseného světla je popsáno v kapitole 1.5.

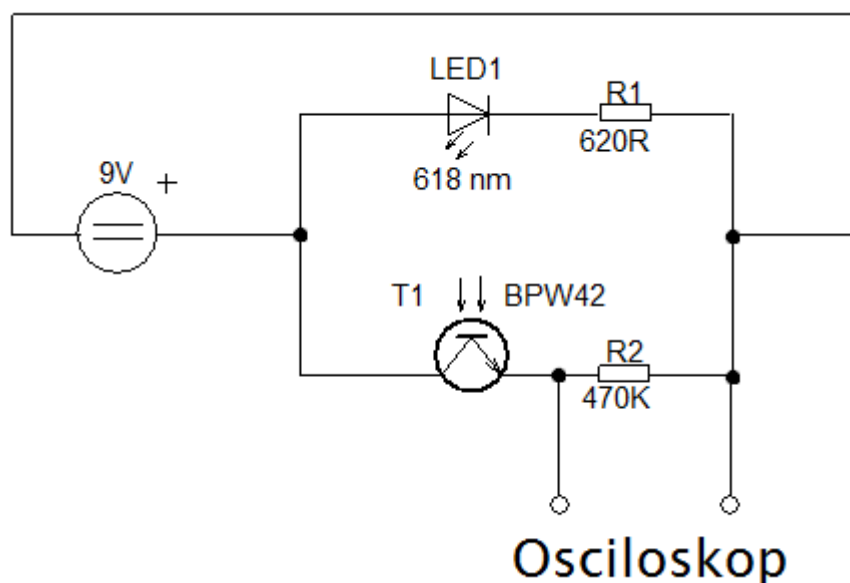
Obrázek 2.5 obsahuje fotografii vyrobeného optického tenzometru, který je namontován na nástavbě vozidla. Tenzometr je umístěn v zadní části vozidla a je orientován vodorovně, kolmo ke směru nárazu vozidla. Jedná se tedy o měřicí pozici „3D“.



Obrázek 2.5: *Optický tenzometr v pozici 3D*

2.3 Elektronická část

Nedílnou součástí návrhu měřící aparatury je také tvorba elektronické části. Ta je obecně složena ze zdroje optického záření a detektoru optického záření. Při návrhu bylo nutné dbát na maximální jednoduchost, nízkou váhu elektronické části a baterie a také na způsob uchycení k nosné nástavbě vozidla. Schéma elektronické části je na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Schéma elektronické části

Detektor optického záření obsahuje fototranzistor BPW42 a odpor R2, na kterém byly zaznamenávány napěťové změny. Fototranzistor je typu NPN, má 3 mm pouzdro, úhlovou citlivost 180° a je schopen detekovat záření s vlnovými délkami 560 – 980 nm [10]. Proud protékající odporem R2 závisí na intenzitě světelného záření dopadajícího na bázi fototranzistoru. Čím větší bude dopadající intenzita záření, tím větší bude protékající proud. Větší proud způsobí větší napětí na odporu R2. Velikost odporu R2 byla zvolena tak, aby na něm bylo možné sledovat změny napětí způsobené otevíráním a zavíráním fototranzistoru.

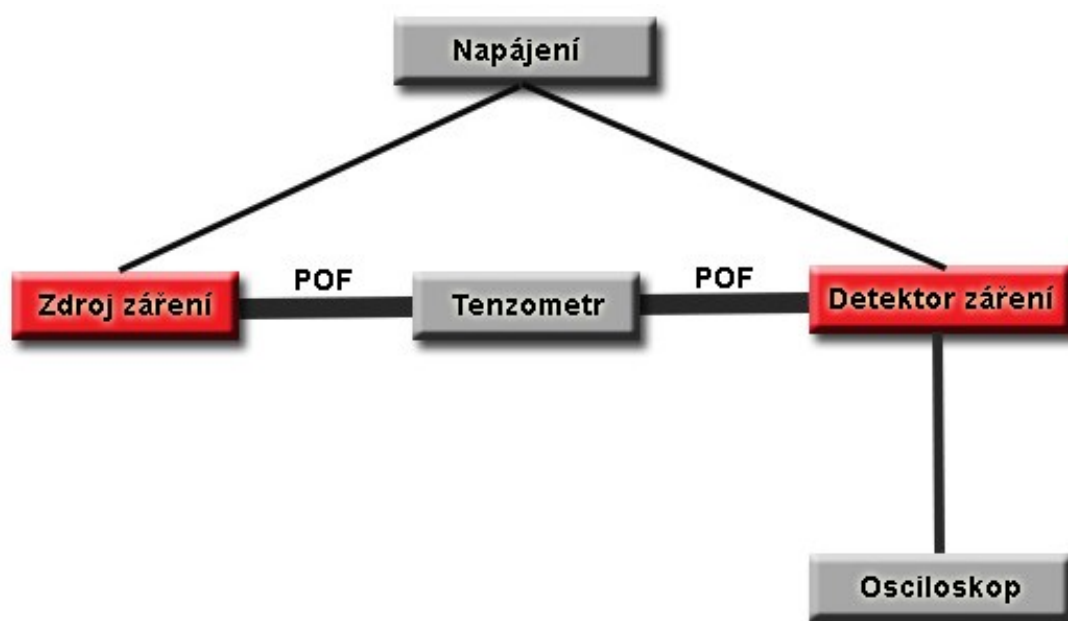
Napájení je zajištěno 9ti voltovou alkalickou baterií, která má kompaktní rozměry, vyznačuje se nízkou pořizovací cenou a lze snadno uchytit k nástavbě. Baterie byla přilepena pomocí pěnové oboustranné lepicí pásky.

Z důvodu bezpečnosti, možnosti optické kontroly a snadnější práce byl zdroj optického záření tvořen LED diodou. Jedná se červenou difuzní diodu o průměru 5 mm, vlnová délka vyzařovaného světla je 618 nm [11]. Z důvodu ochrany diody je v sérii připojen ochranný odpor R1. Velikost odporu bylo vypočítaná pomocí vzorce 2.1. Protékající proud byl zvolen 15 mA.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{9}{15 \cdot 10^{-3}} = 600 \, \Omega \quad (2.1)$$

2.4 Kompletní zapojení

Kompletní zapojení měřící soustavy sestávalo ze zdroje a detektoru optického záření, optického vláknového tenzometru a plastových optických vláken. Schéma je náplní obrázku 2.7. Na výstup detektoru optického záření byl připojen čtyř-žilový metalický kabel, sloužící jako prodlužovací vedení. Na toto prodloužení byl připojen osciloskop, který nemohl být umístěn na vozidle.

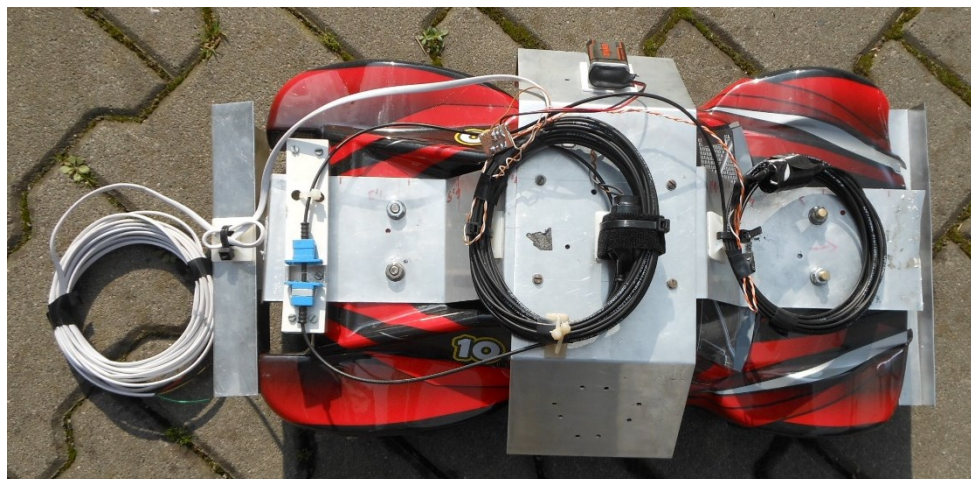


Obrázek 2.7: Blokové zapojení senzoru

Vazební prvek, sloužící k uchycení zdroje optického záření a plastového optického vlákna tvořil silonový válec o průměru 20 mm a délce 30 mm. V ose válce byla vyvrtána dutina, do které je zaveden konektor plastového optického vlákna a LED dioda. Průměry vstupních otvorů přesně odpovídají průměru konektoru vlákna a průměru LED diody. Druhý konec plastového vlákna je uchycen na vstupu do optického tenzometru. Z výstupu tenzometru je optické vlákno napojeno pomocí stejného principu na detektor záření. Díky značné citlivosti fototranzistoru bylo nutné omezit vliv okolního světelného záření. Vazební člen detektoru optického záření a plastového optického vlákna byl vyroben z materiálu propouštějícího optické záření. Kvůli zamezení vlivu okolního osvětlení byl vazební člen zakryt neprůhlednou elektrikářskou páskou.

Pro uchycení plastových optických vláken a vazebních prvků k nástavbě vozidla byly použity samolepící plastové úchyty, ke kterým byly tyto díly připevněny pomocí plastových stahovacích pásek. Vzniklé spojení bylo dostatečně pevné, takže při nárazu nedocházelo k ovlivnění získaných dat,

které mohlo být způsobeno pohybem vazebního členu, pohybem propojovacích optických vláken a dalšími nežádoucími jevy. Použití samolepících plastových úchytů bylo také vhodné kvůli nutným změnám uspořádání plastových optických vláken při přesunu optického tenzometru do jiné měřicí konfigurace.



Obrázek 2.8: Kompletně sestavený měřicí model

Na obrázku 2.8 je fotografie kompletně sestaveného modelu vozidla. Jde vidět tvar nástavby a způsob jejího uchycení na vozidlo. Zároveň lze pozorovat umístění nárazníků, chránících vozidlo před poškozením během nárazů. Součástí zadního nárazníku je také uchycení prodlužovacího metalického vedení složené pro připojení osciloskopu. V zadní části nástavby vozidla lze spatřit namotnovaný vláknový optický tenzometr, do které jsou napojena plastová optická vlákna. Jak již bylo zmíněno, plastová vlákna jsou připevněna k nástavbě vozidla. Na boční stěně nástavby je uchycena napájecí baterie. Ve středové části nástavby je uchycen vazební člen, sloužící ke spojení plastového optického vlákna a fototranzistoru.

3 Experimentální měření

Experimentální měření závislosti odezvy vláknového tenzometru s intenzitní modulací na poloze a velikosti působících sil probíhalo za použití připraveného modelu vozidla. Pro každou měřicí pozici a každou orientaci senzoru bylo provedeno deset měření, během kterých byl proveden náraz modelu do pevné překážky. Ve všech případech se jednalo o čelní náraz do překážky vzdálené přibližně 1 metr od výchozí pozice modelu. Ukázka probíhajícího měření je na obrázku 3.1. Průběh změn mechanického napětí při nárazu vozidla byl pro každý pokus zaznamenáván digitálním osciloskopem s pamětí Tektronix TDS 1002B.



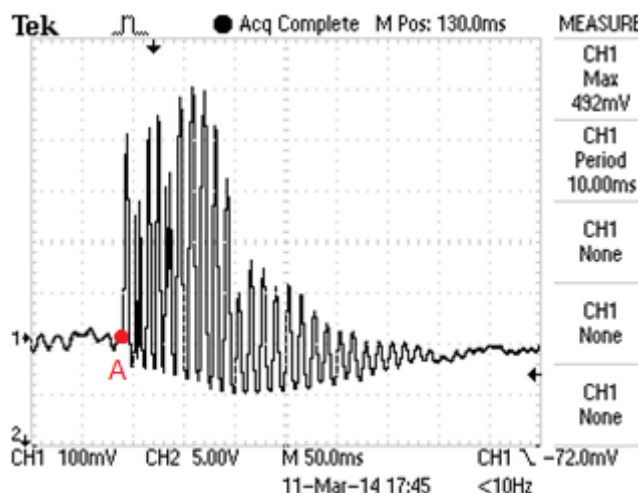
Obrázek 3.1: *Průběh měření nárazu*

Po úvodní kalibraci osciloskopu bylo provedeno nastavení rozlišení časové osy, která byla nastavena na 50 ms/dílek. Jelikož displej osciloskopu zobrazuje 10 dílků, délka zobrazeného průběhu byla 500 ms. Při všech dalších měřeních musela být hodnota časového rozlišení nezměněna. Vzorkovací frekvence osciloskopu je 1 GS/s, což znamená 10^9 vzorků za sekundu. Při ukládání náměru však došlo ke snížení vzorkovací frekvence, jelikož uložené soubory obsahují pouze 2500 vzorků. Pokud je známá doba trvání náměru a počet vzorků, lze snadno dopočíst vzorkovací frekvenci. Výpočet je proveden ve vzorci 3.1.

$$f_{VZ} = \frac{\text{počet vzorků}}{\text{doba trvání}} = \frac{2500}{500 \cdot 10^{-3}} = 5000 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Je logické, že není možné spouštět záznam ručně. Proto byl použit automatický spouštěč (trigger), který uložil průběh signálu při poklesu napětí pod stanovenou spouštěcí úroveň. Uložený průběh byl také časově posunutý, součástí náměru byl také průběh mechanického pnutí před nárazem. Díky tomuto posunutí lze z průběhu lépe pochopit změřený děj.

Jelikož nebyl optický tenzometr sestaven z ideálních komponentů, velikost přeneseného světelného výkonu byla pro každé měření různá. Nastavení napěťové osy bylo závislé na aktuálním měřicí pozici optického tenzometru a také na přesném zaměření konců vláken proti sobě. Ukázka zaznamenaného průběhu nárazu je na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Zaznamenaný průběh pnutí při nárazu, pozice 2D

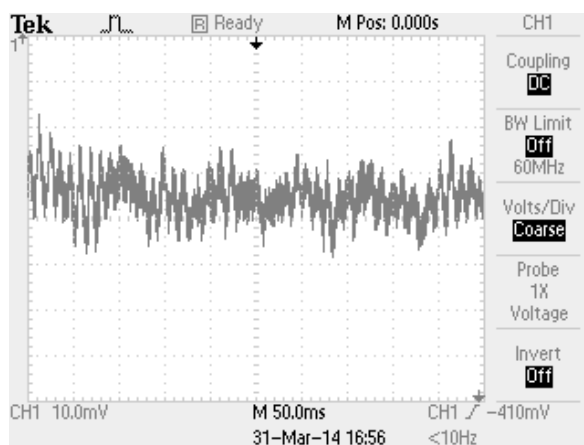
V první části průběhu na obrázku 3.2 jsou zaznamenány výchylky tenzometru způsobené vlastními vibracemi vozidla, které jsou tvořeny otáčením pneumatik vozidla, otáčkami chladícího ventilátoru, chodem motoru a dalšími vlivy. V bodě „A“ došlo k nárazu vozidla. Od tohoto bodu je patrné silné rozkmitání jazýčku tenzometru, které je způsobeno silami působícími při nárazu.

3.1 Měření vlastních kmitů vozidla

Z důvodu eliminace vlastních vibrací vozidla, které jsou způsobeny chodem chladícího ventilátoru elektronického regulátoru otáček vozidla, otáčkami motoru vozidla a také pneumatikami vozidla bylo provedeno 30 měření, během kterých nedocházelo k nárazu vozidla ale pouze k jeho jízdě.

Měření bylo prováděno následujícím postupem: po zapnutí napájení modelu automobilu bylo nutné počkat přibližně minutu, než došlo k dosažení maximálních otáček ventilátoru. Poté byl model uveden do pohybu a během pohybu modelu došlo k zaznamenání průběhu změn mechanického napětí pomocí optického tenzometru. Před zahájením dalšího měření byl model nadzvednut a znovu položen. Získané hodnoty byly zaznamenány digitálním osciloskopem Tektronix TDS 2002B, který má stejnou vzorkovací frekvence jako model Tektronix TDS 1002B.

Na obrázku 3.3 je ukázka záznamu vlastních kmitů vozidla v časové oblasti. Z průběhu je možno určit přibližnou velikost napětí těchto kmitů, jedná se o hodnotu $U_{\text{peak-peak}} \approx 20 \text{ mV}$. Velikost výchylky způsobené nárazem vozidla dosahovala hodnot přibližně 500 mV. Vlastní kmity vozidla tedy nejsou příliš výrazné.



Obrázek 3.3: Záznam vlastních kmitů vozidla

Získané průběhy změn napětí v časové oblasti bylo nutné převést do amplitudového spektra. Toto spektrum popisuje získaný náměr z hlediska jednotlivých frekvenčních složek a jejich amplitud. Práce s frekvenčními složkami je jednodušší, jelikož je lze snáze porovnávat.

Pro zobrazení spektra signálu byla použita rychlá Fourierova transformace, která používá efektivní algoritmus k výpočtu diskrétní Fourierovy transformace. Výpočty byly provedeny v programu Matlab verze R2010b. Matlab používá pro výpočet rychlé Fourierovy transformace (FFT) Cooley-Turkey algoritmus [12].

Součástí přílohy A této práce je skript napsaný v programu Matlab, který slouží pro výpočet průměrného spektra vlastních vibrací vozidla. V úvodu skriptu je definována vzorkovací frekvence získaných dat, která byla vypočítána vzorcem 3.1. V dalším kroku je pomocí cyklu načteno 30 souborů obsahujících záznamy vlastních vibrací vozidla. Digitální osciloskop Tektronix exportuje záznamy ve formátu „.csv“, který obsahuje 5 datových sloupců oddělených čárkami. Data v prvních třech sloupcích obsahují informace o nastavení osciloskopu, datum a čas měření a další údaje, které nejsou pro zpracování dat nutné.

Výchozí názvy souborů uložených pomocí osciloskopu Tektronix jsou ve tvaru „F0000CH1.CSV“ s postupnou inkrementací číselné hodnoty v názvu souboru. Jelikož byly během měření získány náměry, které neobsahovaly záznam nárazu vozidla, došlo k přejmenování souborů. Aktuální pojmenování datových souborů je ve tvaru „0001.CSV“ s postupnou inkrementací číselné hodnoty.

První částí skriptu je definice pracovní oblasti smyčky pro automatické načtení vstupních dat.

```
for cyklus = 1:30
```

Pomocí číselných hodnot lze určit, které soubory budou při zpracování cyklu načteny. Jelikož bylo provedeno 30 měření vlastních vibrací vozidla a názvy jsou ve tvaru „0001.CSV“ až „0030.CSV“, cyklus bude pracovat s odpovídajícími číselnými hodnotami.

```
nazev_souboru = sprintf('%0*d', 4, cyklus);  
nazev_souboru_csv = sprintf('%0*d.CSV', 4, cyklus);
```

Pomocí kódu uvedeného nad textem dojde k vytvoření názvu, který je složen z aktuální číselné hodnoty proměnné *cyklus*. Jelikož je název souborů vždy tvořen čtyřmístným číslem, dojde k doplnění potřebným počtem nul z levé strany. Při každém běhu smyčky je hodnota proměnné *cyklus* jiná, jelikož je po každém průběhu cyklu navýšena o jedničku až do dosažení koncové podmínky. Koncová podmínka říká, kolikrát má být smyčka opakována, v tomto případě je počet opakování nastaven na třicet.

```
fid = fopen (nazev_souboru_csv, 'rt');  
data = textscan(fid, '%*s %*s %*s %f %f', 'Delimiter', ',', 'CollectOutput', 1);
```

Do proměnné *fid* je načten obsah souboru odpovídající aktuálnímu názvu proměnné *nazev_souboru_csv*. Parametr „rt“ obecně značí, jakým způsobem má být soubor otevřen. Konkrétní hodnota parametru otevře soubor v režimu čtení v textovém módu.

Jelikož je známá struktura datových souborů, lze snadno odstranit nežádoucí informace. Pro potřeby další analýzy jsou nutné pouze hodnoty ve čtvrtém a pátém sloupci. Proto je použit příkaz *textscan*, který uloží do proměnné *data* právě tyto požadované sloupce. Vstupními parametry příkazu *textscan* je proměnná *fid* obsahující samotné data. Dále jsou specifikovány typy dat v jednotlivých sloupcích. Obsahem prvních tří sloupců jsou textové řetězce, které nejsou dále nutné. Pomocí znaku hvězdičky lze tyto sloupce ignorovat. Parametr „%*s“ tedy říká, že sloupec obsahující textové řetězce bude ignorován. Obsahem posledních dvou sloupců jsou číselné hodnoty typu *float*, což jsou hodnoty s desetinnou čárkou. U definice těchto sloupců není uvedena hvězdička, tudíž tyto hodnoty nebudou ignorovány. Dalším parametrem je *Delimiter*, který určuje znak oddělující data. Tímto znakem je v uložených datových souborech čárka. Posledním parametrem je *CollectOutput*, který má zadanou hodnotu 1. Při tomto nastavení budou data z obou sloupců uložena do stejného datového pole.

```
data = data{1};  
fclose(fid);  
time = data(:, 1);  
voltage = data(:, 2);
```

Prvním příkazem jsou hodnoty v proměnné převedeny do matice. Příkaz *fclose* zavře soubor s názvem uloženým v proměnné *fid*. Následně je první datový sloupec proměnné *data* uložen do proměnné *time*. Posledním příkazem je provedeno uložení druhého datového sloupce do proměnné *voltage*.

```
N=length(voltage);  
fft_values(:, cyklus) = fft(voltage)/N;
```

Pro další zpracování je nutné znát počet vzorků, se kterými se bude pracovat. Toho lze docílit příkazem *length(voltage)*, který uloží do proměnné *N* počet napěťových vzorků, které byly zaznamenány digitálním osciloskopem.

Následně je prováděn samotný výpočet rychlé Fourierovy transformace. Vypočítané spektrum je uloženo do proměnné *fft_values*. V této proměnné je po proběhnutí všech cyklů obsaženo 30 sloupců, obsahujících vypočítaná spektra 30 vstupních signálů. Číslo sloupce odpovídá číslu vstupního signálu.

```
fft_suma=sum(fft_values, 2);  
fft_mean=(fft_suma/cyklus);
```


Dalším krokem je výpočet průměrného spektra vlastních vibrací vozidla. Příkazem *sum* je vypočítána suma proměnné *fft_values*, parametr 2 určuje výpočet sumy po řádcích. Obsahem proměnné *fft_sum* tedy budou součty všech hodnot na stejných řádcích v proměnné *fft_values*.

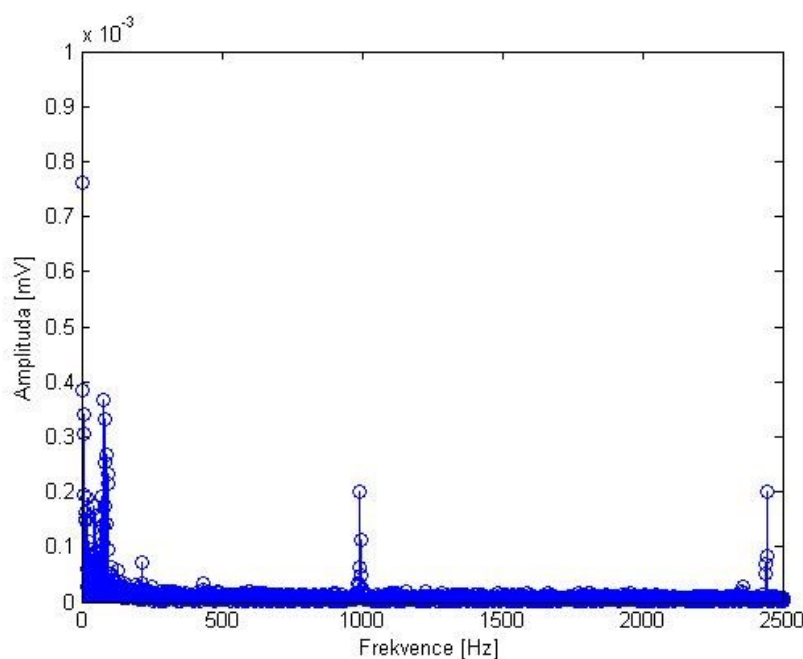
Náplní proměnné *fft_mean* je podíl hodnot *fft_sum* a počtu zpracovávaných souborů. Tím jsou získány průměrné hodnoty spektra vlastních vibrací vozidla.

```
Mod = zeros(size(fft_mean));
Mod(1) = abs(fft_mean(1));
Mod(2:end) = 2*abs(fft_mean(2:end));
Delta_f = Fvz/N;
f=0:Delta_f:Fvz-Delta_f;
```

Dále vytvořena proměnná *Mod*, která obsahuje složky amplitudového spektra jednotlivých průběhů. Také je proveden výpočet minimální rozlišitelné frekvence, což odpovídá minimálnímu kroku na frekvenční ose. Rovněž je definována frekvenční osa v rozsahu 0 až 5000 Hz.

```
figure;
stem(f, Mod);
axis([0,2500,0, 0.001])
xlabel('Frekvence [Hz]')
ylabel('Amplituda [mV]')
```

Posledním krokem je vykreslení amplitudového spektra vlastních kmitů vozidla, které je zobrazeno na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Spektrum vlastních vibrací vozidla

Spektrum vlastních vibrací vozidla obsahuje několik frekvenčních špiček, které lze přisoudit výše uvedeným otáčivým součástkám vozidla.

3.2 Měření průběhů nárazů vozidla

Optický tenzometr bylo možné namontovat na pět různých měřících pozic na nástavbě vozidla. Měřící pozice jsou znázorněny na obrázku 2.2. Tenzometr mohl být instalován ve čtyřech měřících polohách, které jsou patrné z obrázku 2.4. Pro každou pozici a orientaci, kterou můžeme nazvat měřící konfigurací, bylo provedeno 10 nárazů. Během každého nárazu byl zaznamenán zachycený průběh mechanického napětí.

Stejně jako při výpočtu vlastních kmitů, byla i v tomto případě provedena rychlá Fourierova analýza získaných dat. Následující pracovní postup popisuje zpracování dat pro jednu měřící konfiguraci. Pro další konfigurace je pracovní postup identický.

Výstupem rychlé Fourierovy transformace je amplitudové spektrum. Pokud vypočítáme podíl spektra nárazu se spektrem vlastních vibrací vozidla, získáme přenosovou funkci, viz. 3.2.

$$\text{Přenosová funkce} = \frac{\text{Spektrum nárazu}}{\text{Spektrum vlastních kmitů}} \quad (3.2)$$

Přenosová funkce určuje, k jaké změně amplitudy došlo u jednotlivých frekvenčních složek spektra. Graf vypočítané přenosové funkce je znázorněn na obrázku 3.5.

```
open('C:\**název_složky**\mean_spectrum.mat');
Klidove_spektrum = ans.fft_mean;
```

První částí skriptu je definování vzorkovací frekvence, která je stejná jako při výpočtu vlastních vibrací vozidla v kapitole 3.1. Dalším krokem je načtení spektra vlastních kmitů vozidla, které bylo získáno v předchozí kapitole. Příkazem *open('cesta k souboru')* byl otevřen soubor obsahující zmíněné spektrum. Toto spektrum je následně uloženo do proměnné s názvem *Klidove_spektrum*.

```
for cyklus = 1:10
navez_souboru = sprintf('%0*d',4,cyklus);
navez_souboru_csv = sprintf('%0*d.CSV',4,cyklus);
fid = fopen(navez_souboru_csv, 'rt');
data = textscan(fid, '%s %s %s %f %f', 'Delimiter', ',', 'CollectOutput', 1);
data = data{1};
fclose(fid);
time = data(:, 1);
voltage = data(:, 2)
```


Další část skriptu slouží k dávkovému načtení dat do programu. Opět zde byla použita smyčka *cyklus*, která byla provedena desetkrát. Ve smyčce byl automaticky generován název otevíraného datového souboru, z tohoto souboru byly pro každou iteraci smyčky načteny data, která byla uložena do odpovídajících proměnných *time* a *data*.

```
N=length(voltage);
Nhalf=N/2;
fft_values(:,cyklus) = fft(voltage)/N;
Prenos(:,cyklus) = fft_values(:,cyklus) ./ Klidove_spektrum;
```

Dále byla vypočítána délka proměnné *voltage*, která říká, kolik vzorků je k dispozici. Krom této proměnné byla vypočítána také hodnota *Nhalf*, která je tvořeno polovinou hodnoty proměnné *N*. Tato poloviční hodnota je potřebná pro správnou interpretaci získaného spektra.

Výstupem rychlé Fourierovy transformace prováděné program Matlab je dvoustranné spektrum, které je symetrické kolem hodnoty 2500 Hz. Tato hodnota je závislá na vzorkovací frekvenci signálu a lze ji vypočítat pomocí vzorcem 3.3.

$$f_{MAX} = \frac{f_{vz}}{2} = \frac{5000}{2} = 2500 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Dále je vypočítáno spektrum jednotlivých vzorků. Z těchto spekter jsou dále vypočítány přenosové funkce odpovídající měřicím pokusům. Po proběhnutí deseti cyklů smyčky je v proměnné *Prenos* 10 datových sloupců, které obsahují hodnoty přenosové funkce dílčích měření.

```
Delta_f = Fvz/N;
f=0:Delta_f:Fvz-Delta_f;
```

Pomocí výše uvedené části skriptu byl definován rozsah frekvenční osy.

```
Prenos_sum=sum(Prenos,2);
Prenos_mean=(Prenos_sum/cyklus);
Prenosova_funkce = zeros(size(Prenos_mean));
Prenosova_funkce(1) = abs(Prenos_mean(1));
Prenosova_funkce(2:Nhalf) = 2*abs(Prenos_mean(2:Nhalf));
```

Obsahem proměnné *Prenos_sum* je suma řádků proměnné *Prenos*. Tato suma je dále dělena počtem zpracovávaných vzorků. Jelikož bylo měření každé konfigurace umístění tenzometru provedeno desetkrát, je i suma dělena číslem 10. Dále je vytvořeno proměnná *Prenosova_funkce*, která byla v první fázi naplněna nulami. Poté je vypočítána absolutní hodnota odpovídající stejnosměrné složce signálu. Posledním krokem je výpočet zbývajících složek přenosové funkce. Tyto výpočty jsou prováděny z důvodu převodu čísel v komplexním tvaru do absolutního tvaru.

```
Max_hodnota = max(Prenosova_funkce);
Maximumx02 = Max_hodnota * 0.2;
Maximumx05 = Max_hodnota * 0.5;
```

Pro potřeby analýzy získaných dat je nutné znát maximální hodnotu přenosové funkce. Ta je zjištěna příkazem *max(Prenosova_funkce)* a je uložena do proměnná *Max_hodnota*. Taktéž jsou definovány dvě rozhodovací úrovně, které jsou tvořeny 20% a 50% maximální hodnoty přenosové funkce.

```
figure;
stem(f, Prenosova_funkce);
line('XData', [0 2500], 'YData', [Maximumx02 Maximumx02], 'LineStyle', '-',
...
'LineWidth', 2, 'Color', 'm');
line('XData', [0 2500], 'YData', [Maximumx05 Maximumx05], 'LineStyle', '-',
...
'LineWidth', 2, 'Color', 'r');
xlim([0 2500])
xlabel('Frekvence [Hz]')
ylabel('Přenos [-]')
```

Dalším krokem je zobrazení vypočítané průměrné přenosové funkce pro danou konfiguraci měření pomocí vláknového optického tenzometru. V zobrazeném spektru jsou rovněž vykresleny rozhodovací úrovně.

```
Vetsi_freqx02 = Prenosova_funkce(Prenosova_funkce > Maximumx02);
Vetsi_freqx05 = Prenosova_funkce(Prenosova_funkce > Maximumx05);
Pocet_freqx02 = length (Vetsi_freqx02)
Pocet_freqx05 = length (Vetsi_freqx05)
```

Pro snazší zjištění počtu složek přenosové funkce splňující jednotlivé rozhodovací úrovně slouží výše uvedený kód. V prvním kroku jsou do proměnných *Vetsi_freqx02* a *Vetsi_freqx05* uloženy složky přenosové funkce s přenosem větším než 20% a 50% maxima. Dále jsou zjištěny délky těchto proměnných, které odpovídají počtům frekvenčních složek splňující jednotlivé podmínky.

```
Soucet(:,1)=Prenosova_funkce(1)+Prenosova_funkce(2)+Prenosova_funkce(3)...
+Prenosova_funkce(4)+Prenosova_funkce(5);

for cyklus1 = 5:5:2495

Soucet(:,cyklus1/5+1)=Prenosova_funkce(cyklus1)+Prenosova_funkce(cyklus1+1)
+Prenosova_funkce(cyklus1+2)...
+Prenosova_funkce(cyklus1+3)+Prenosova_funkce(cyklus1+4);
end
```

Jelikož se v přenosové funkci mohly objevit shluky složek s větším přenosem, které ovšem nepřesahovaly rozhodovací podmínky stanovené procenty z maximální hodnoty, bylo provedeno snížení frekvenčního rozlišení. Původní minimální rozlišitelná frekvence přenosové funkce byla 2 Hz. Během podvzorkování byla frekvence snížena na 10 Hz. Hodnoty přenosu jednotlivých složek ovšem nebyly tvořeny průměrem vypuštěných vzorků, ale jejich součtem. Kód provádějící zmíněné podvzorkování je uveden výše.

```

Max_hodnota10 = max(Soucet);
Maximum10x02 = Max_hodnota10 * 0.2;
Maximum10x05 = Max_hodnota10 * 0.5;

Vetsi_freq10x02 = Soucet(Soucet > Maximum10x02);
Vetsi_freq10x05 = Soucet(Soucet > Maximum10x05);
Pocet_freq10x02 = length (Vetsi_freq10x02)
Pocet_freq10x05 = length (Vetsi_freq10x05)

```

Znovu je vyhledána maximální hodnota přenosu podvzorkované přenosové funkce. Dále jsou stanoveny hodnoty rozhodovacích úrovní. Taktéž jsou zjištěny počty jednotlivých frekvenčních složek s přenosem splňujícím tyto podmínky.

```

Delta_f10 = Fvz/length(Soucet);
f10=Delta_f10:Delta_f10:Fvz;

figure;
stem(f10, Soucet);
line('XData', [0 2500], 'YData', [Maximum10x02 Maximum10x02], 'LineStyle',
'--', ...
    'LineWidth', 2, 'Color','m');
line('XData', [0 2500], 'YData', [Maximum10x05 Maximum10x05], 'LineStyle',
'--', ...
    'LineWidth', 2, 'Color','r');
xlim([0 2500])
xlabel('Frekvence [Hz]')
ylabel('Přenos [-]')

```

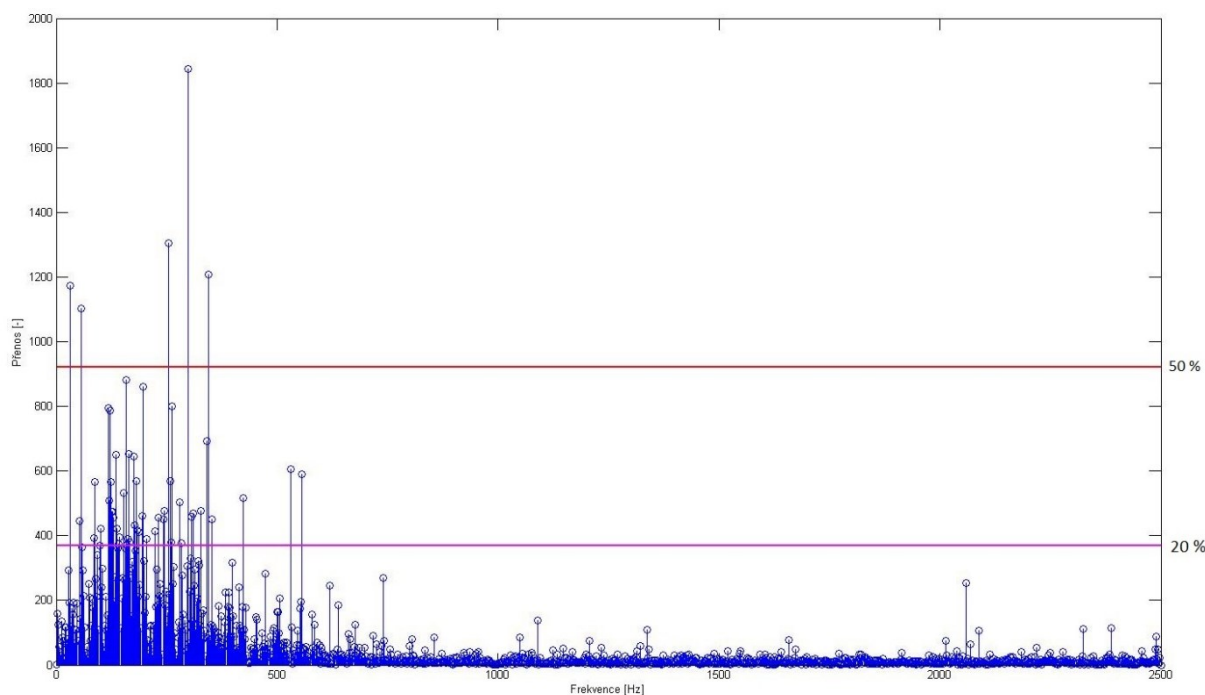
Poslední částí skriptu je přizpůsobení frekvenční osy pro podvzorkovanou přenosovou funkci. Následně je vykreslen graf přenosové funkce, který rovněž obsahuje použité rozhodovací úrovně.

3.3 Vyhodnocení získaných dat

Výstupem všech měření pro jednotlivé konfigurace umístění vláknového optického tenzometru na vozidle jsou dvě přenosové funkce. První má minimální frekvenční rozlišení 2 Hz, druhá 10 Hz. Tyto přenosové funkce jsou vykresleny do grafu a navíc jsou doplněny o rozhodovací úrovně. Grafy jednotlivých přenosových funkcí jsou přiloženy na DVD disku.

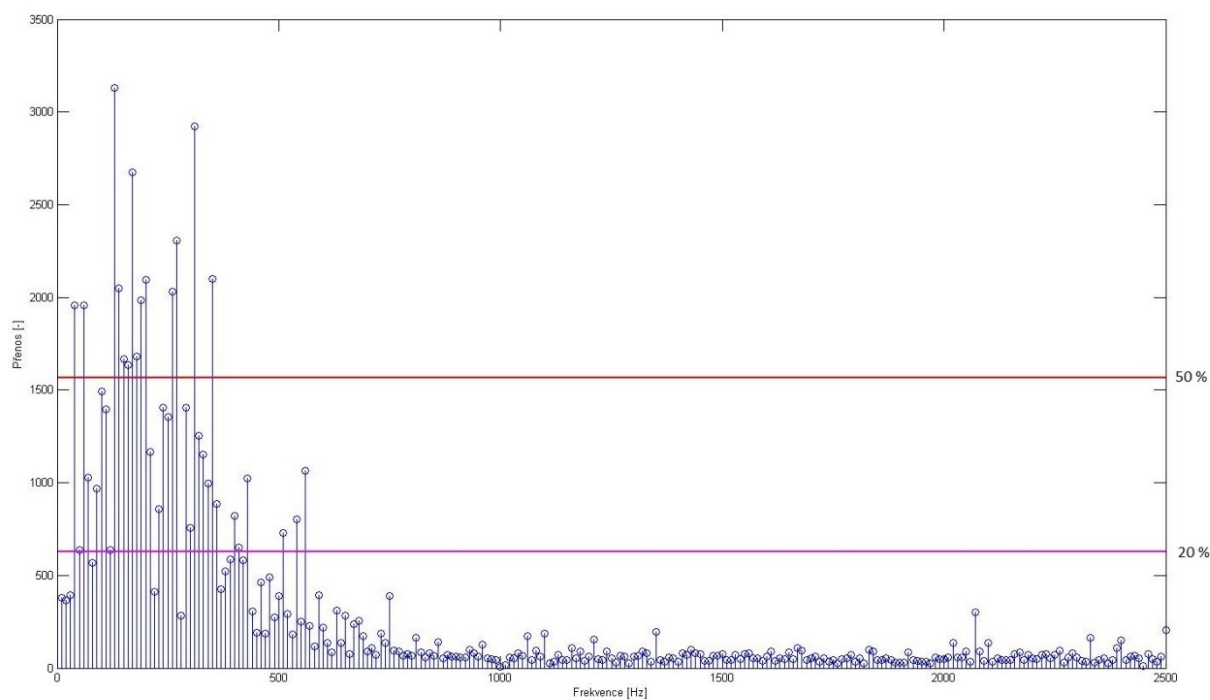
Jak již bylo uvedeno výše, zjišťoval se počet jednotlivých frekvenčních složek, který je vyšší než 20% maximální hodnoty přenosu nebo větší než 50% maximální hodnoty přenosu. Čím více frekvenčních složek s vysokým přenosem zaznamená vláknově optický tenzometr, tím lépe obecně zachytí náraz vozidla do pevné překážky. Zároveň lze očekávat lepší funkčnosti v případě dalšího výzkumu, který by měl popisovat typ nárazu a jeho sílu.

Obsahem obrázku 3.5 je přenosová funkce s frekvenčním rozlišením 2 Hz, která přísluší měřicí konfiguraci „2D“. Součástí grafu jsou také rozhodovací úrovně.



Obrázek 3.5: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 2D

Obrázek 3.6 obsahuje graf podvzorkované přenosové funkce získané měřením s optickým tenzometrem v konfiguraci „2D“. Součástí grafu jsou rovněž rozhodovací úrovně.



Obrázek 3.6: Přenosová funkce ($\Delta f = 10$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 2D

Měřicí konfigurace senzoru je tvořena kombinací jeho umístění na vozidle a orientací senzoru. Počty frekvenčních složek splňujících procentuální hladiny je obsahem tabulky 3.1.

Největší počet frekvenčních složek přenosové funkce s rozlišením 2 Hz, které jsou větší než 20% maximální hodnoty přenosové funkce, bylo dosaženo při použití měřicí konfigurace 2D. Tato konfigurace zaznamenala 52 frekvencí.

Při hledání počtu frekvenčních složek přesahujících 50% maximální hodnoty přenosové funkce bylo nalezeno 10 frekvencí splňujících tuto podmínku. Těchto 10 frekvencí bylo zachyceno při měřicí konfiguraci 3B

U podvzorkované přenosové funkce byl největší počet frekvenčních složek splňujících podmínku 20% maximální hodnoty přenosu zaznamenán u měřicí konfigurace 2D. Takto umístěný tenzometr zachytil 36 frekvencí.

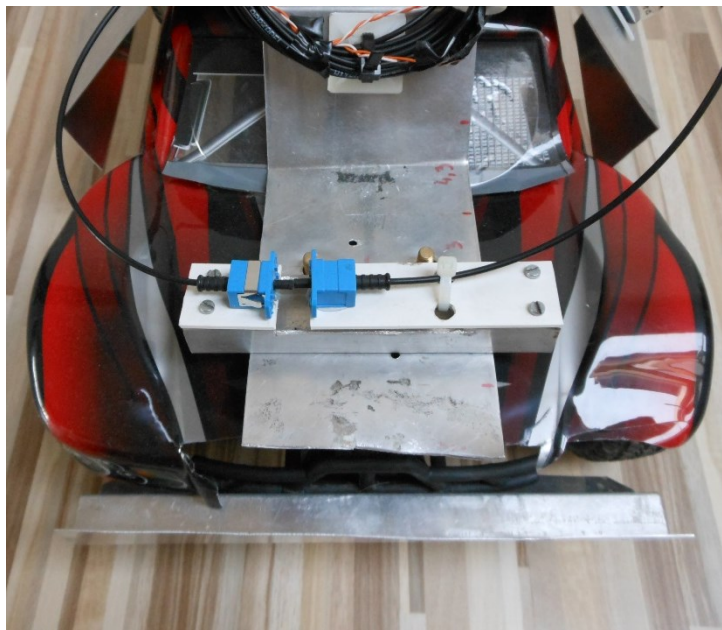
V této měřicí konfiguraci bylo rovněž zaznamenáno nejvíce frekvenčních složek větších než 50% hodnoty maximální přenosové funkce. Počet zaznamenaných frekvencí je 14.

Tabulka 3.1: Počty frekvenčních složek splňujících rozhodovací kritéria.

MĚŘENÍ	$\Delta F = 2 \text{ HZ}$		$\Delta F = 10 \text{ HZ}$	
	Počet frekvencí > 0,2*MAX	Počet frekvencí > 0,5*MAX	Počet frekvencí > 0,2*MAX	Počet frekvencí > 0,5*MAX
1A	14	3	27	4
1B	30	7	20	7
1C	9	4	4	1
1D	30	6	12	2
2A	16	5	13	1
2B	19	4	28	11
2C	15	3	22	3
2D	52	5	36	14
3A	21	3	15	5
3B	49	10	14	7
3C	19	5	12	3
3D	22	8	16	4
4A	15	6	9	3
4B	22	5	13	1
4C	12	4	3	1
4D	28	6	19	5
5A	8	2	8	2
5B	13	2	8	1
5C	26	8	11	3
5D	19	6	8	1

Na základě získaných dat lze rozhodnout o ideálním umístění vláknového optického tenzometru na nástavbu vozidla, při kterém je nejlépe zaznamenána charakteristika nárazu. Rozhodnutí je podloženo daty v tabulce 3.1. Nejlepší měřicí konfigurací je „2D“, která zachytila největší počet frekvenčních složek splňujících stanovená kritéria.

Při této konfiguraci byl vláknově optický tenzometr umístěn na přední části vozidla. V případě skutečného vozidla by byl tenzometr umístěn v oblasti přední kapoty popřípadě u motoru vozidla. Orientace senzoru byla vodorovná se zemským povrchem a kolmá k směru jízdy vozidla. Fotografie modelu vozidla s optickým tenzometrem namontovaným v měřicí pozici „2D“ je na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7: Měřicí konfigurace 2D

4 Závěr

Optické senzory našly své uplatnění téměř ve všech odvětvích použití. Cílem této práce bylo ověřit, zda je možné používat vláknově optické tenzometry v automobilovém průmyslu. Jedná se o jedno z mála použití, které dosud není v praxi využíváno a nebylo ani prostudováno.

Prvním krokem bylo provedení rešerše týkající se dostupných optických tenzometrů a jejich funkčních principů. Na základě této rešerše byl vybrán vhodný funkční princip, který bude navržený vláknově optický tenzometr používat. Díky snadné výrobě a dostupnosti potřebných součástí bylo rozhodnuto o výrobě vlastních optického tenzometru, který bude pracovat na principu intenzitního senzoru s extrinziční modulací amplitudy přenášeného světelného záření.

Také byl proveden rozbor citlivosti různých typů optických vláken. U navrženého vláknově optického tenzometru mělo docházet k více typům posunu čel optických vláken. Největší vliv však měl radiální posun optických vláken. Na základě provedeného rozboru citlivosti byl vybrán vhodný typ optického vlákna. Rozhodnutí také ovlivnilo požadavky na přesnost výroby optického tenzometru. Pro vlastní konstrukci tenzometru byla použita plastová optická vlákna, která mají největší průměr jádra vlákna. Velkou výhodou plastových optických vláken je možnost použití světelného záření ve viditelné oblasti, které usnadnilo stavbu optického tenzometru.

Kvůli potřebě otestovat vlastnosti navrženého tenzometru byl zakoupen dálkově řízený model vozidla, který svým vzhledem a chováním suploval skutečný automobil. Model vozidla neobsahoval vhodné kotvicí body, ke kterým by bylo možné uchytit optický tenzometr a potřebné příslušenství. Proto byla vyrobena kovová nástavba vozidla, která byla připevněna k rámu modelu vozidla. Při výrobě nástavby bylo počítáno s přípravou montážních pozic pro uchycení tenzometru. Nástavba také sloužila jako nosič dalších potřebných komponentů, jako jsou plastová optická vlákna, vazební prvky, napájení a další.

S využitím vyrobeného optického tenzometru byla provedena experimentální měření odezvy tenzometru v závislosti na velikosti a směru působících sil. Optický tenzometr bylo možno umístit na pět různých měřících pozic na nástavbě vozidla. Zároveň mohl mít optický tenzometr čtyři různé orientace. Pro každou unikátní konfiguraci umístění vláknového optického tenzometru byla provedena měření, při nichž docházelo k nárazu modelu vozidla do pevné překážky.

Získaná data byla převedena do frekvenční oblasti a byla provedena jejich analýza. Na základě této analýzy bylo vybráno nejlepší umístění vláknového optického tenzometru na vozidle.

Diplomová práce prokázala použitelnost intenzitních vláknově optických tenzometrů v automobilovém průmyslu. Během experimentálních měření byl tenzometr schopen zaznamenat působení sil, vznikajících během nárazu vozidla.

Sestavený tenzometr měl dostatečnou citlivost. Pro další vývoj není nutné pracovat s jiným typem optických vláken, která by nepříznivě ovlivnila výrobní náklady senzoru. Citlivost senzoru je možné snadno ovlivňovat mechanickými vlastnostmi pružného jazýčku tenzometru. Pokud bude snížena jeho pružnost, tenzometr bude méně citlivý. Na citlivost má také vliv délka toho jazýčku.

Výhodou navrženého tenzometru je odolnosti proti elektromagnetickému rušení, které se nepříznivě projevuje u běžně používaných elektrických tenzometrů. Nevýhodou elektrických tenzometrů jsou rovněž malé napěťové změny, které mohou být během přenosu ztraceny v šumu. Navržený optický tenzometr pracuje s dostatečnou intenzitou světla, tudíž k podobným projevům nedochází.

Použitá literatura

- [1] BUBELA, O. *Plastová optická vlákna a jejich aplikace v praxi*. Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 89s Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Šporik.
- [2] FAIR, Mike, Mike BROWN a Alex TAM. 4DSP LLC. *Why an Airplane Bends, and How They Make Sure It Doesn't Break [online]*. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: http://www.4fos.com/pdf/WP_Plane.pdf
- [3] PELIKANDANIEL.COM. HiMoto ZENIT SC Brushless RTR s 2,4 GHz soupravou, kar. červená [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://pelikandaniel.com/?sec=product&id=70007>
- [4] SALEH, Bahaa E a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky: Fundamentals of Photonics*. první vydání. Překlad Radomir Miroslav Dušek. Praha: Matfyzpress, 1994, xvii, 226 s. ISBN 80-858-6301-4.
- [5] FANG, Zujie, Ken K. CHIN, Ronghui QU a Haiwen CAI. *Fundamentals of optical fiber sensors*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2012, xiii, 476 p. ISBN 978-047-0575-406.
- [6] ČMIEL, Radek. *Optický telefon s parabolickými zrcadly*. Ostrava, 2010. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/78656>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Vladimír Vašínek.
- [7] ŠIŠKA, Petr. *Nekomunikační aplikace optických vláken: skriptum*. Ostrava.
- [8] Fiber Bragg Gratings. *Brigham Young University* [online]. © 1994-2009 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.photonics.byu.edu/fbg.phtml>
- [9] Overview of Fiber Optic Sensing Technologies. *National Instruments Corporation* [online]. 30.6.2011 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/12953/en/>
- [10] Katalogový list fototranzistoru BPW42. In: *GES-ELECTRONICS* [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/b/bpw42.pdf>
- [11] Katalogový list LED diody. In: *GES-ELECTRONICS* [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: http://www.ges.cz/sheets/h/hb5_135r.pdf
- [12] Fast Fourier transform. In: *Mathworks.com* [online]. © 1994-2014 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>
- [13] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: začínáme se signály*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 271 s. ISBN 80-730-0200-0.
- [14] REDFERN, Darren a Colin CAMPBELL. *The MATLAB 5 handbook*. New York: Springer, c1998, xi, 488 p. ISBN 03-879-4200-9.
- [15] MOORE, Lori. *Single Mode Fiber Coupling: Sensitivities and Tolerancing* [online]. December 8, 2006 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://fp.optics.arizona.edu/optomech/student%20reports/tutorials/LMooreTutorial1.doc>

Přílohy

V této příloze jsou zobrazeny zaznamenané přenosové funkce odpovídající jednotlivým měřicím konfiguracím. Součástí přílohy je také DVD obsahující všechna naměřená data a použité skripty.

Součástí přílohy je DVD disk.

Seznam příloh

Příloha A	ii
Příloha B	ii

Příloha A

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

DP_KRE0049_DVD\3D modely

DP_KRE0049_DVD\Fotografie

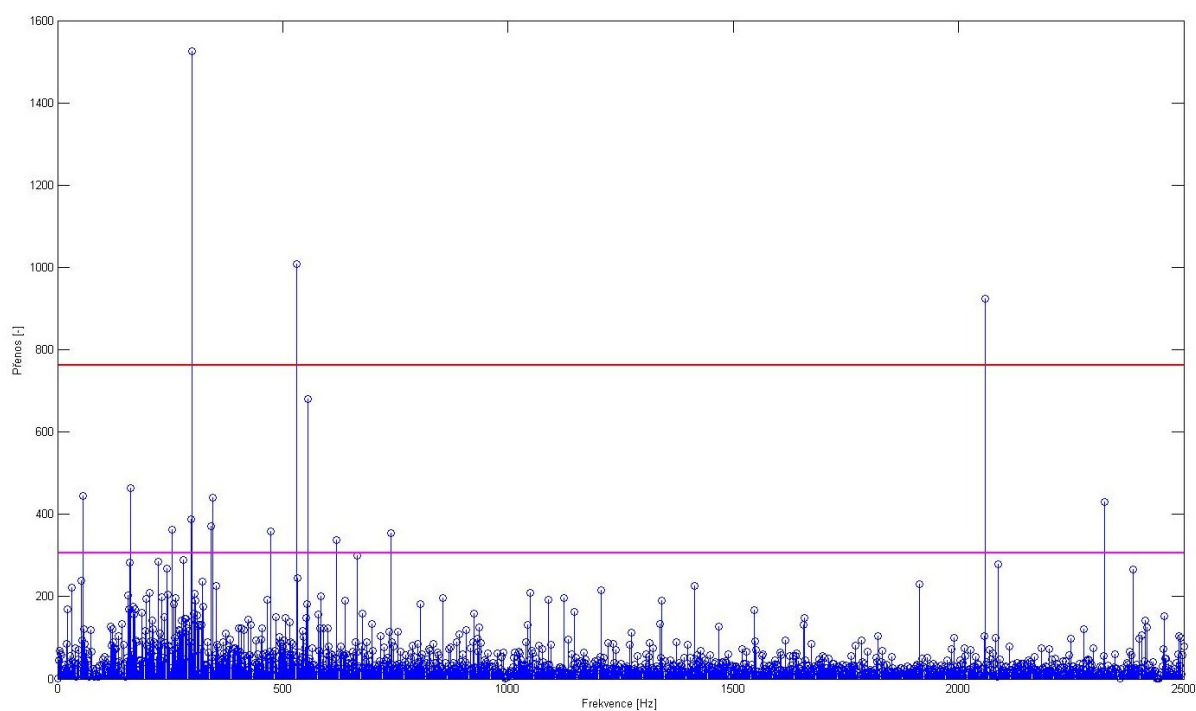
DP_KRE0049_DVD\Přenosové funkce

DP_KRE0049_DVD\Skripty

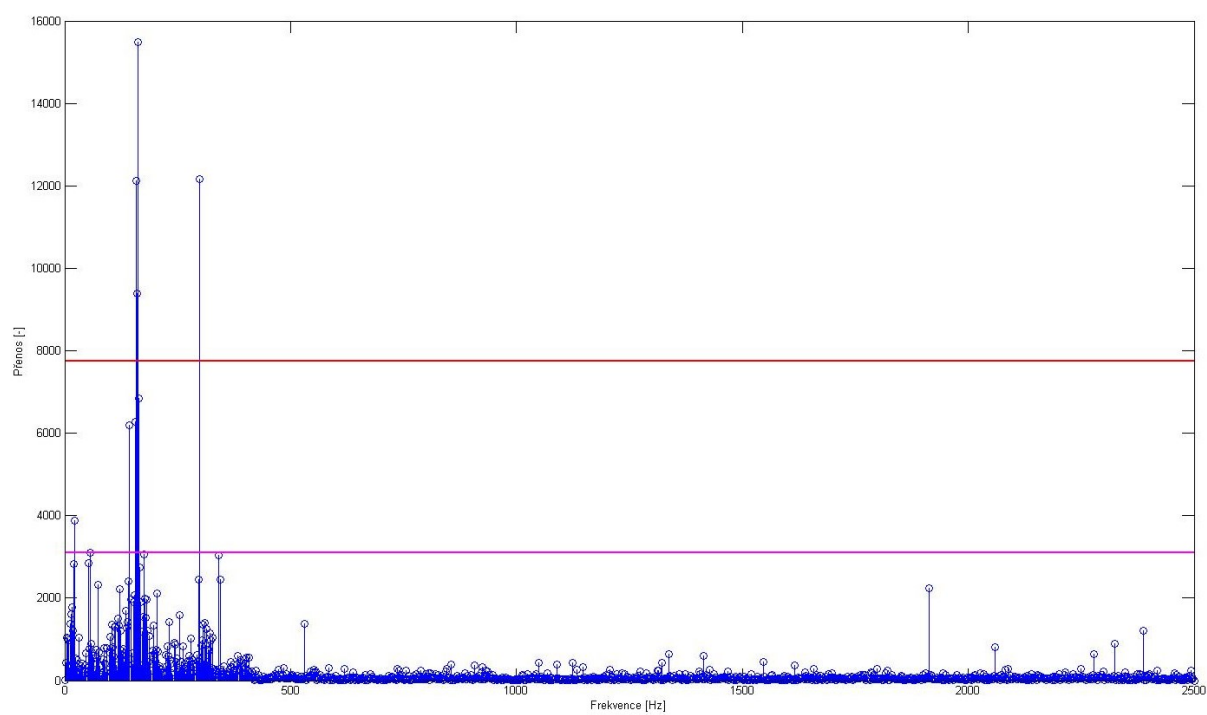
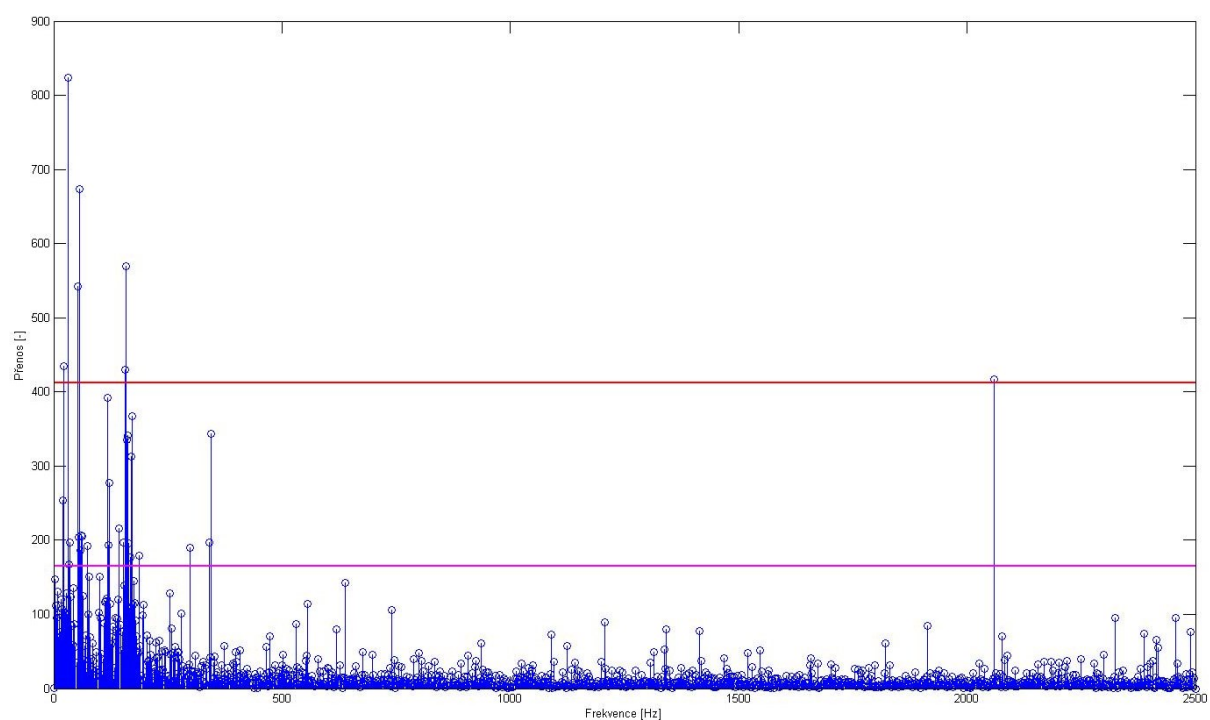
DP_KRE0049_DVD\Změřená data

Příloha B

Přenosové funkce odpovídající jednotlivým konfiguracím měření.

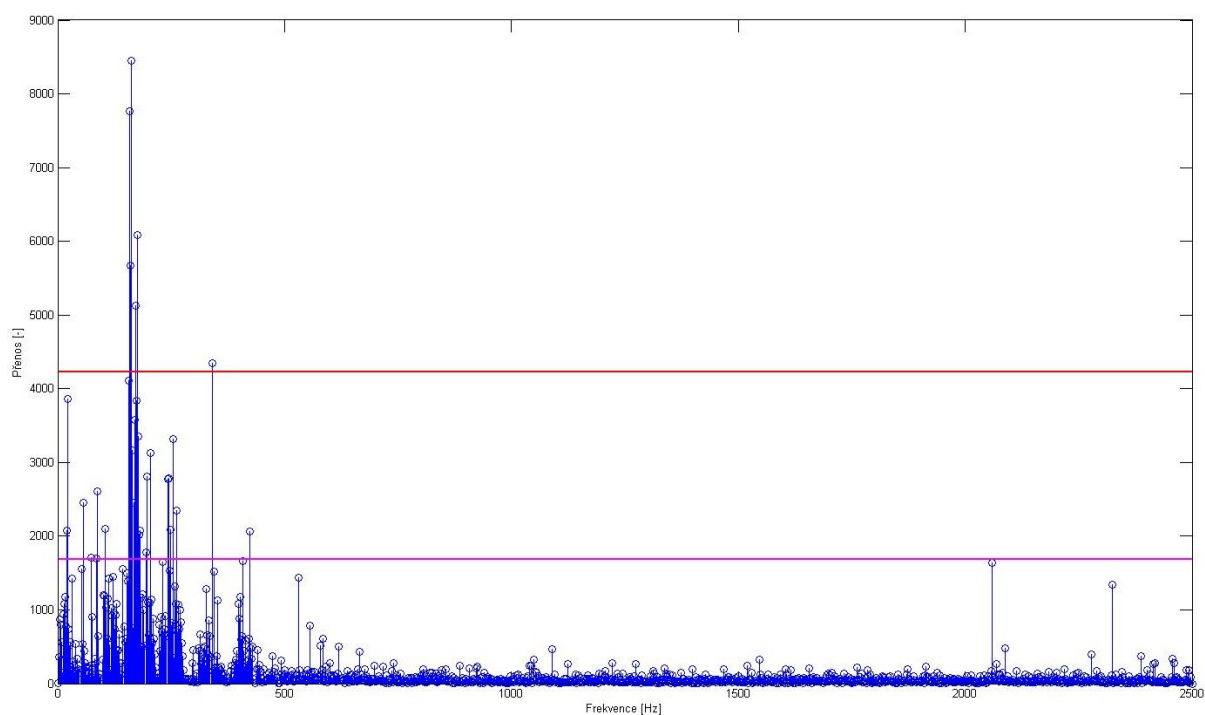


Obrázek 1: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 1A

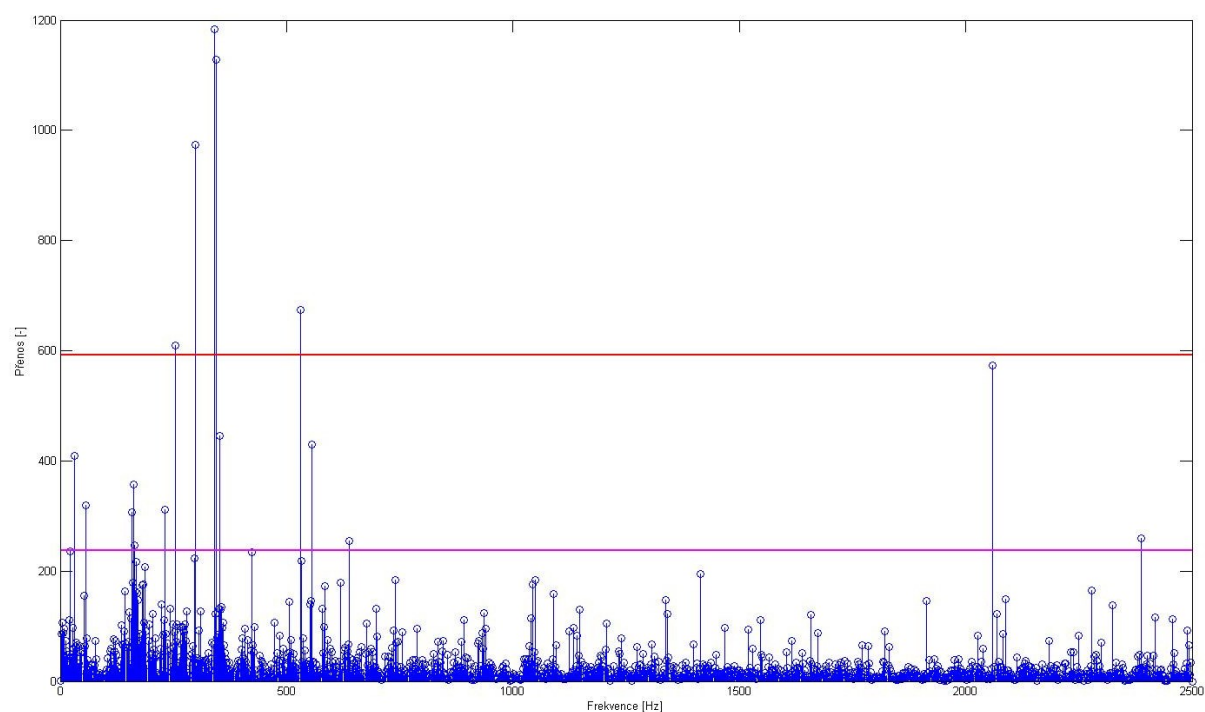


Obrázek 3: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 1C

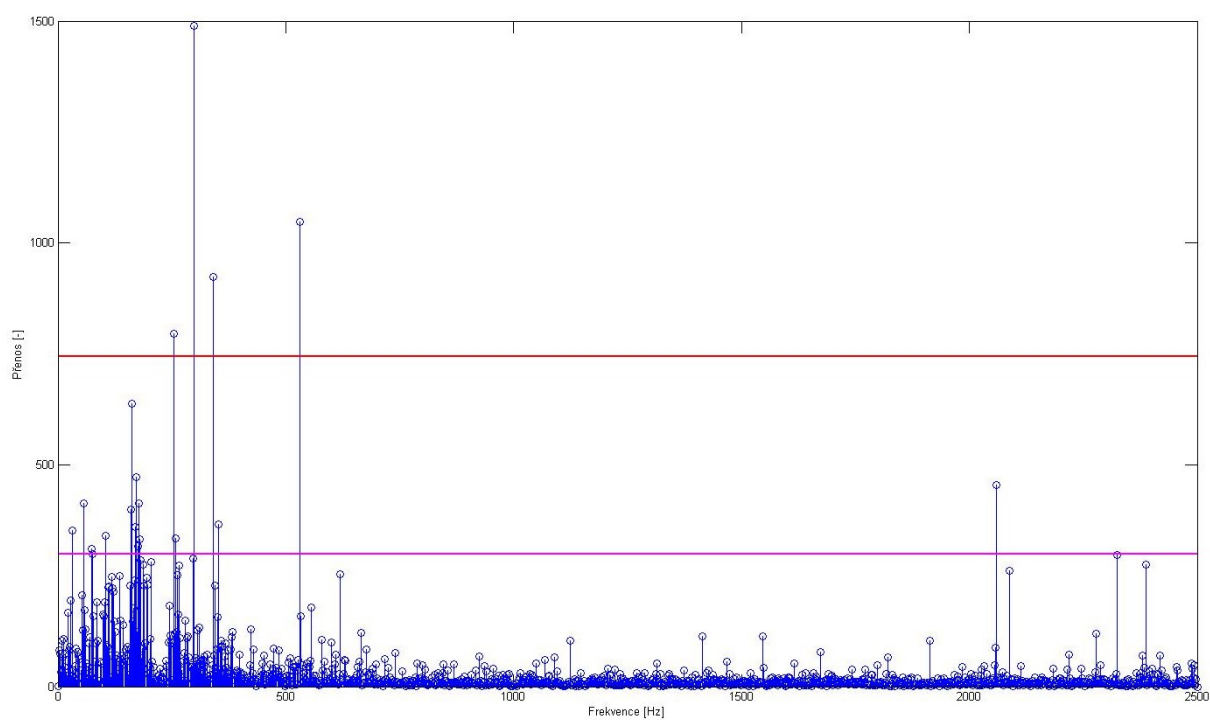
Obrázek 2: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 1B



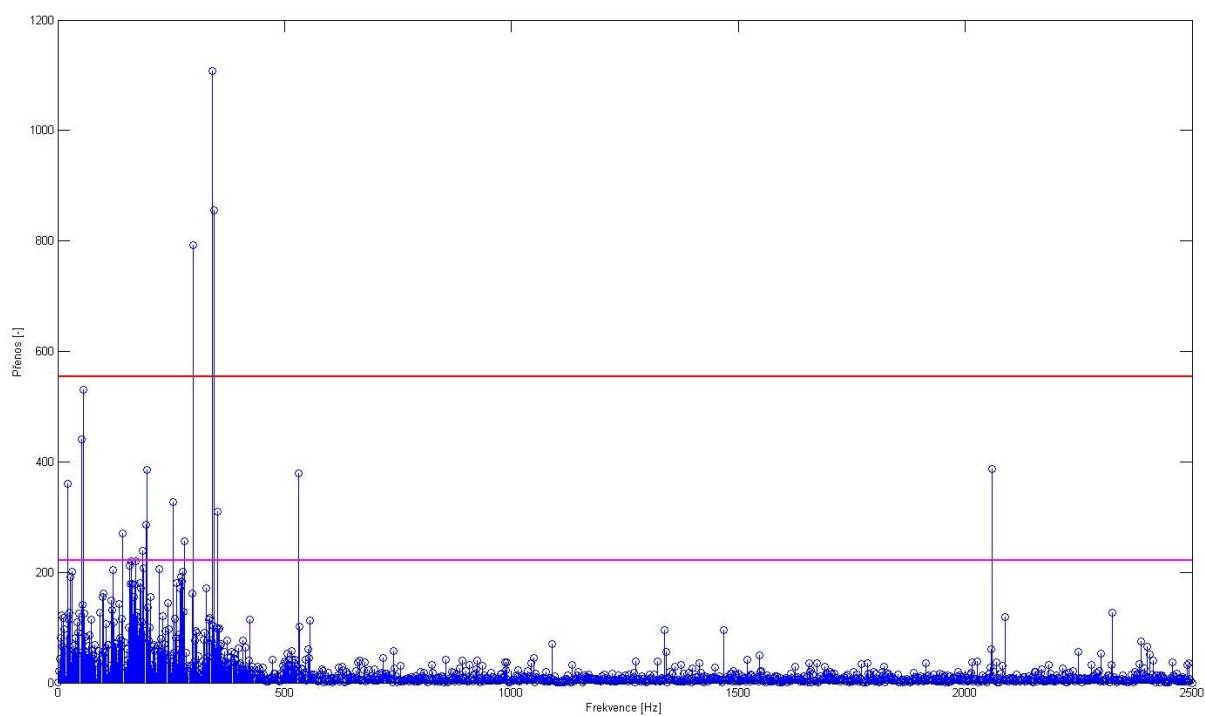
Obrázek 4: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 1D



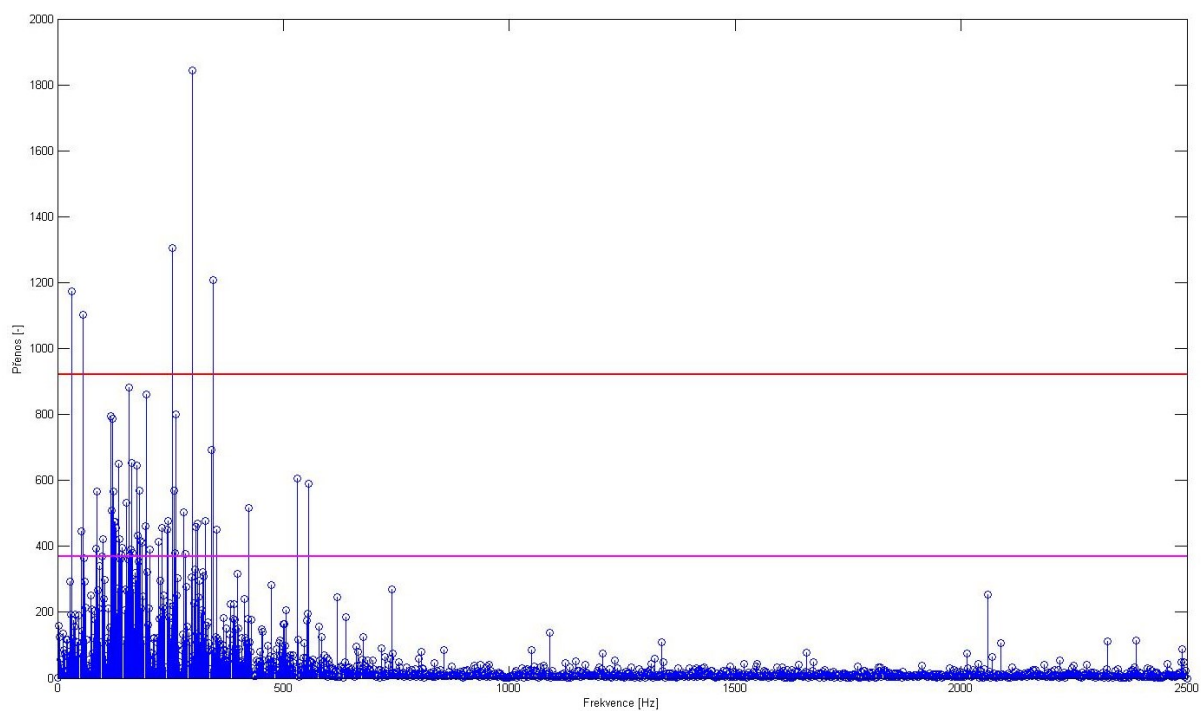
Obrázek 5: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 2A



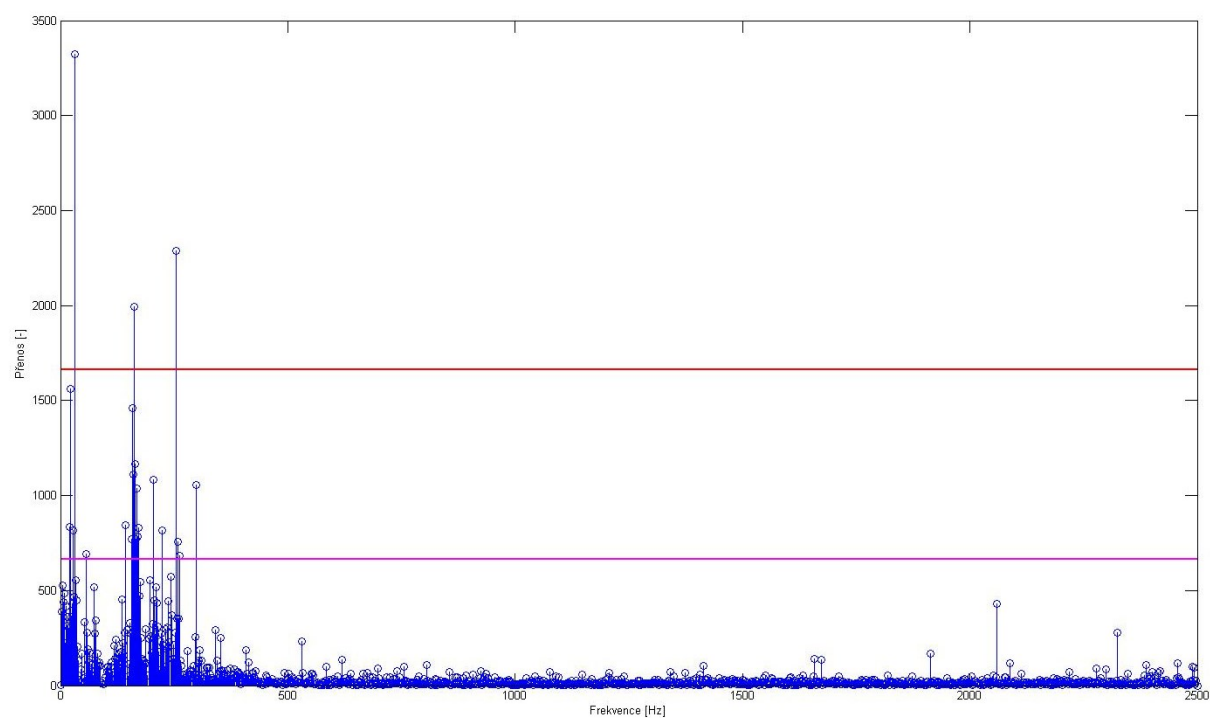
Obrázek 6: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 2B



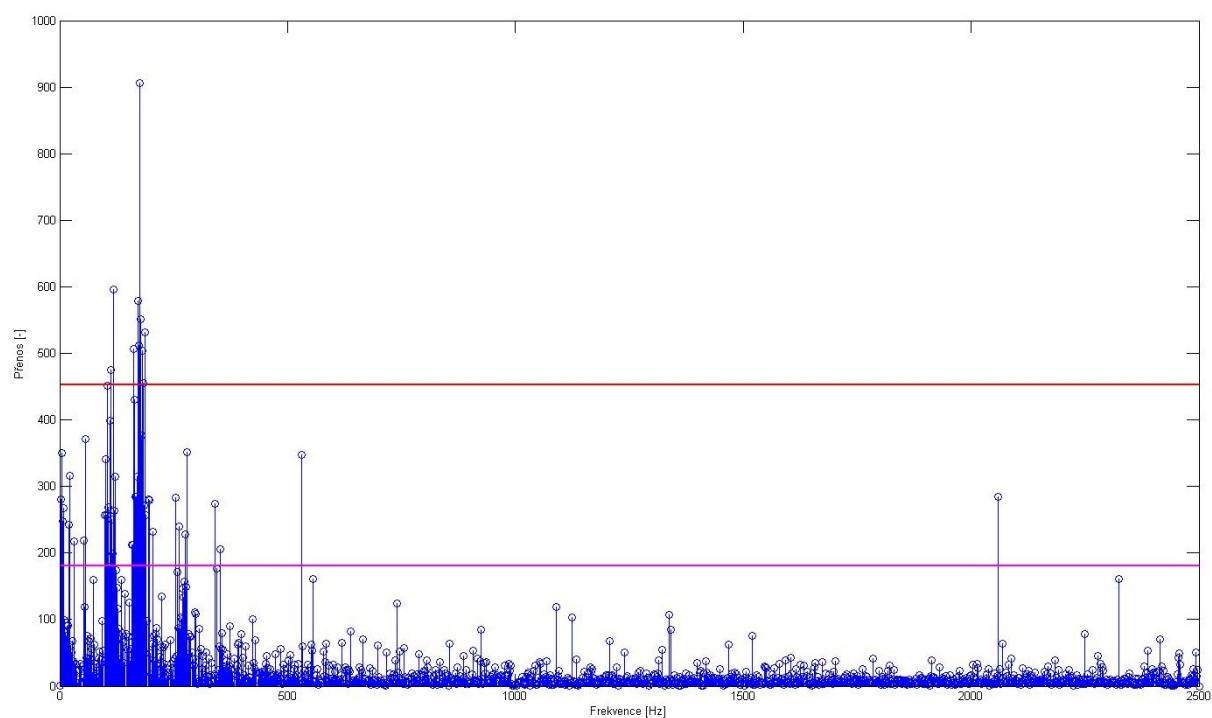
Obrázek 7: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 2C



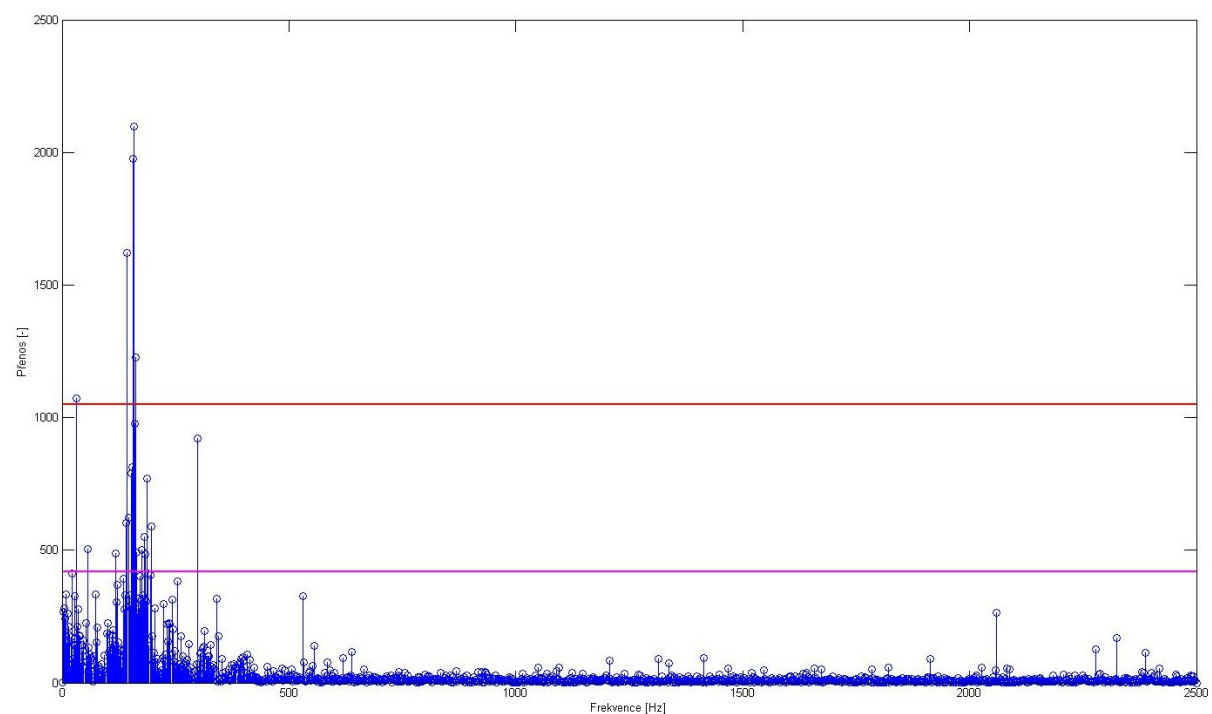
Obrázek 8: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 2D



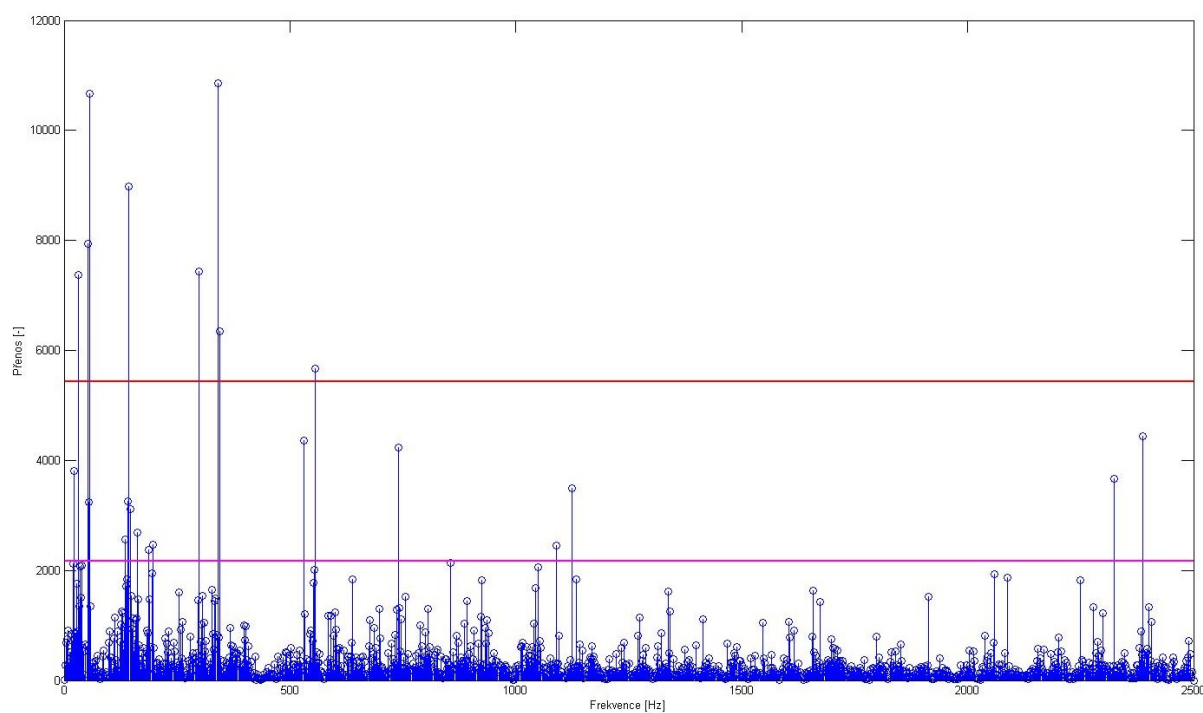
Obrázek 9: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 3A



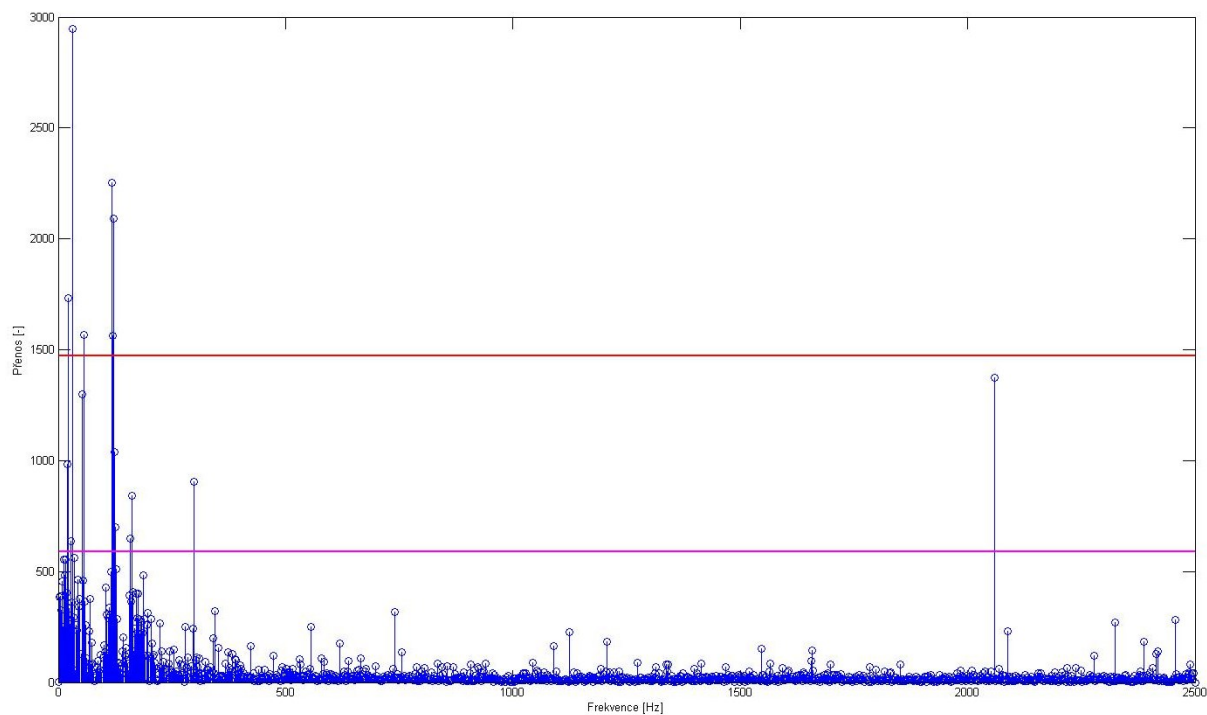
Obrázek 10: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 3B



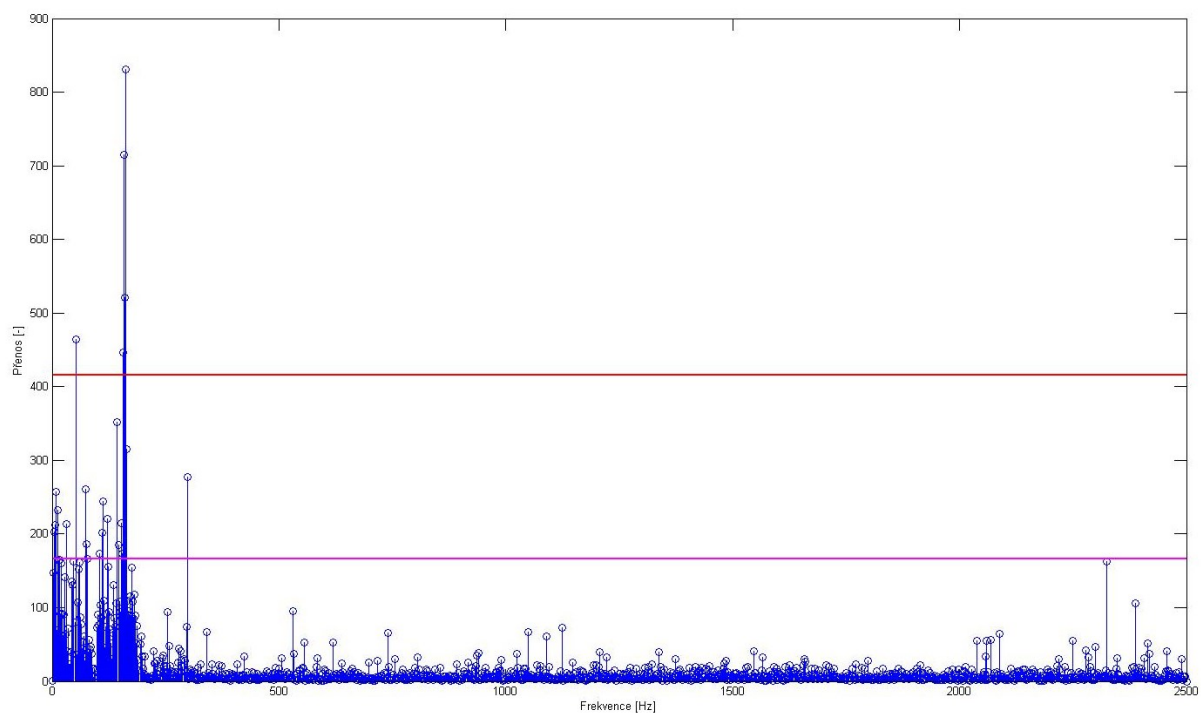
Obrázek 11: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 3C



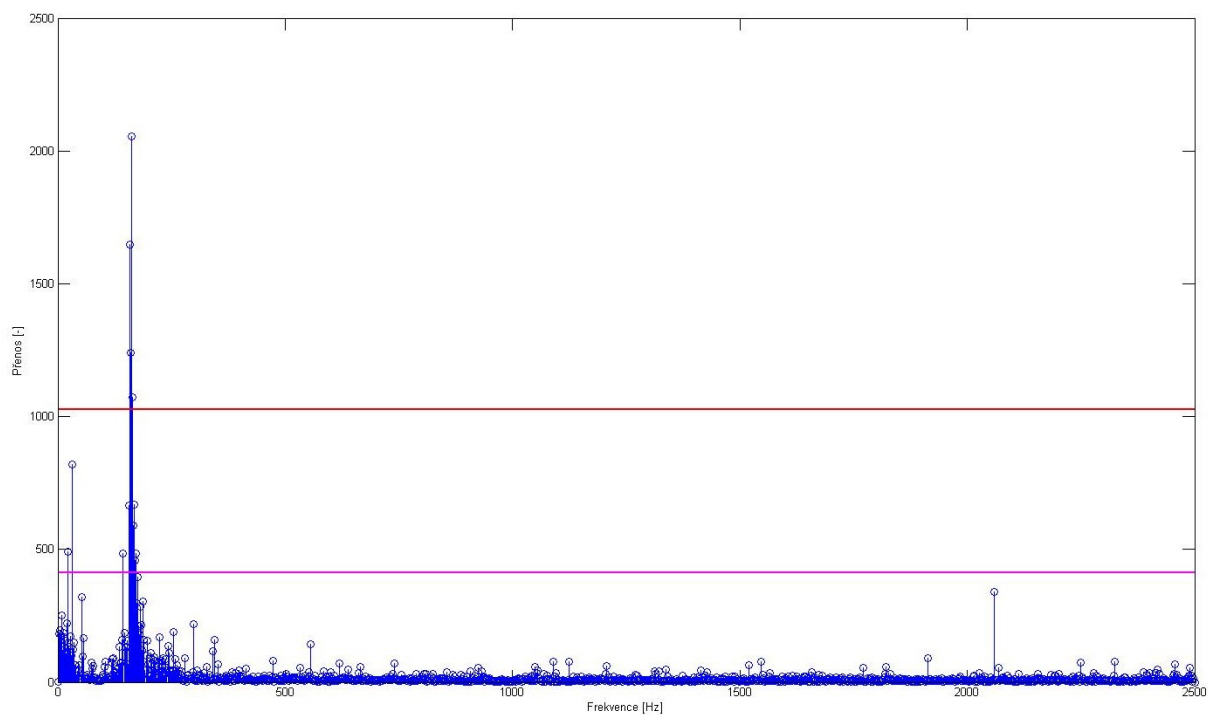
Obrázek 12: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 3D



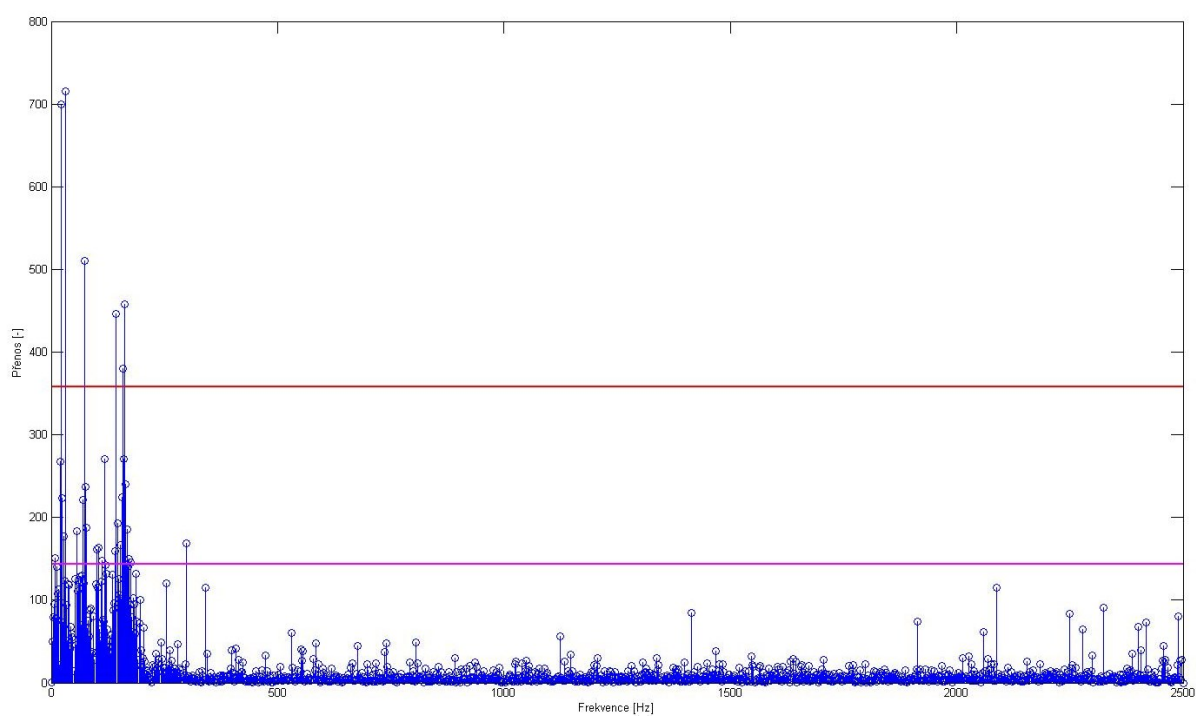
Obrázek 13: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 4A



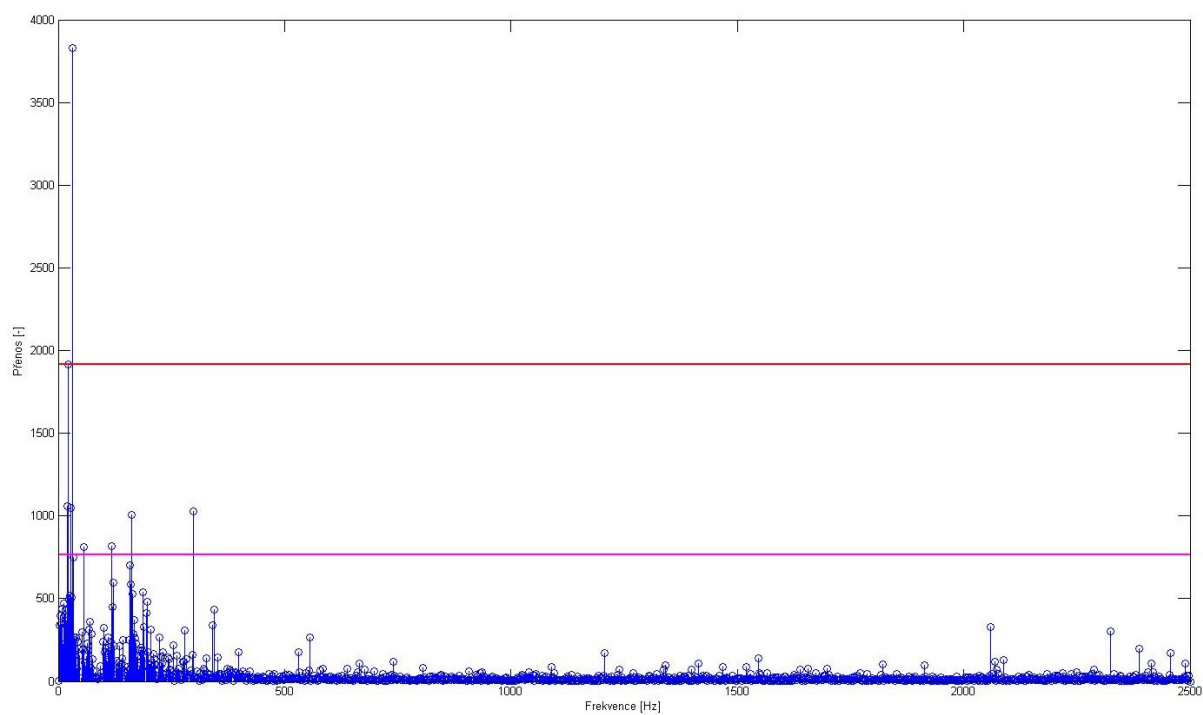
Obrázek 14: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 4B



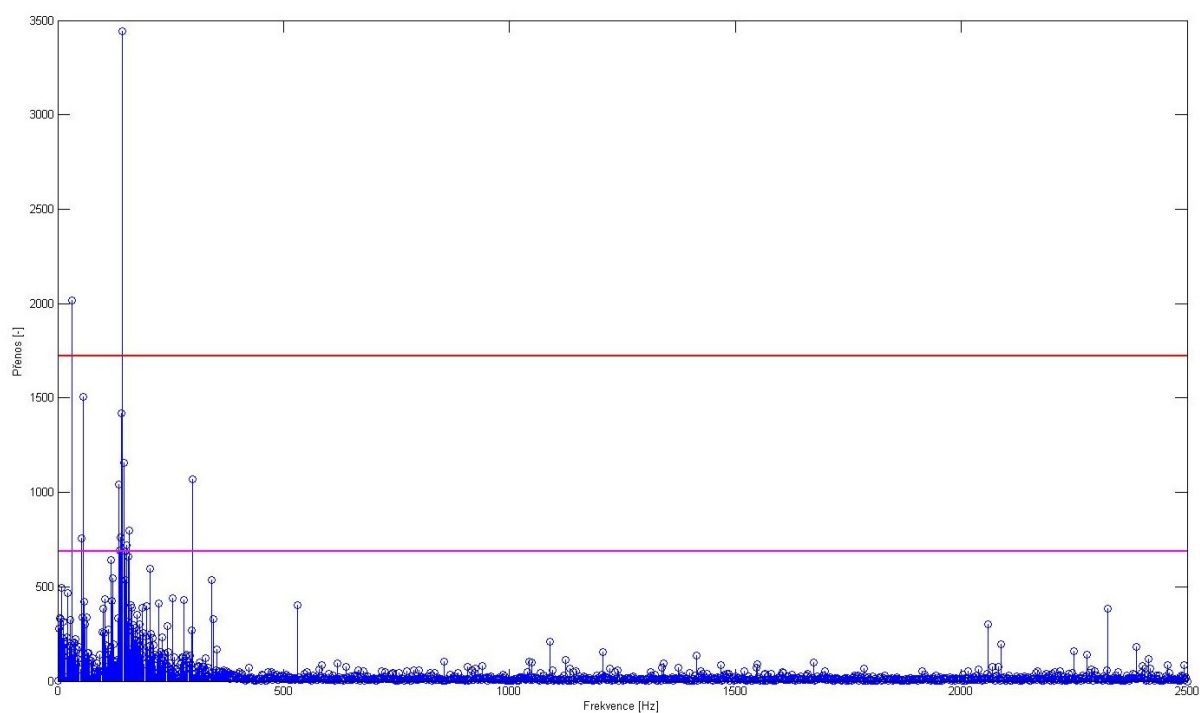
Obrázek 15: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 4C



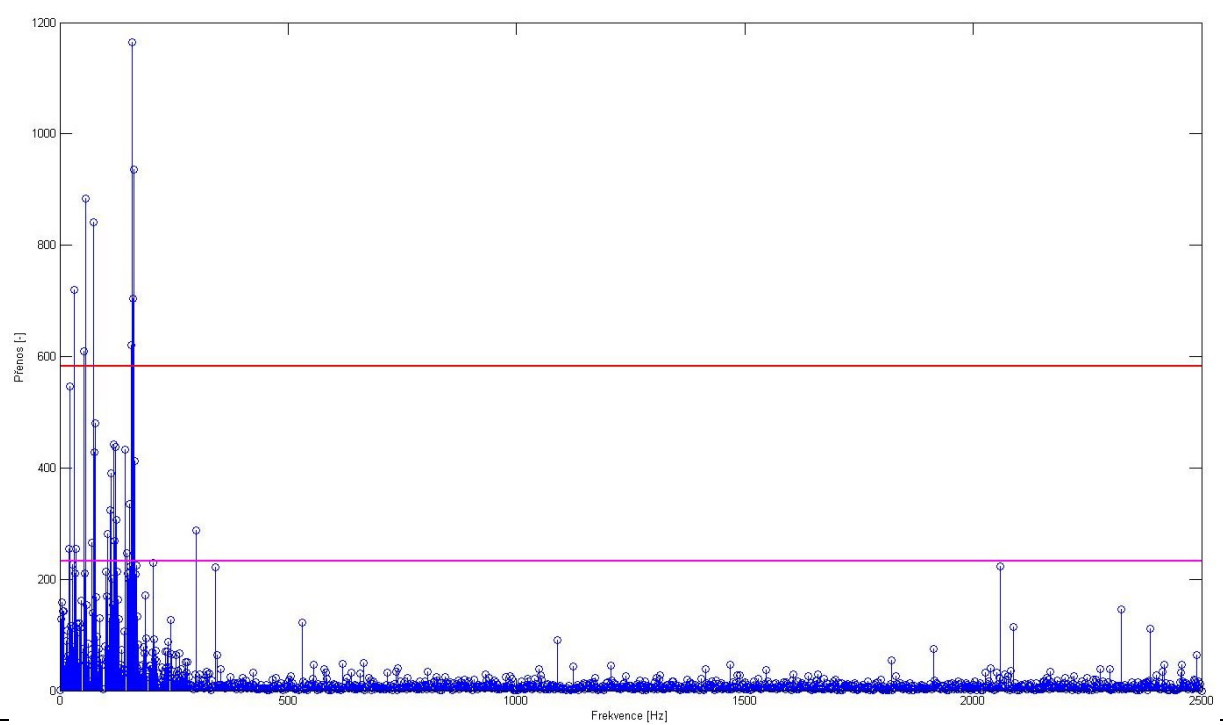
Obrázek 16: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 4D



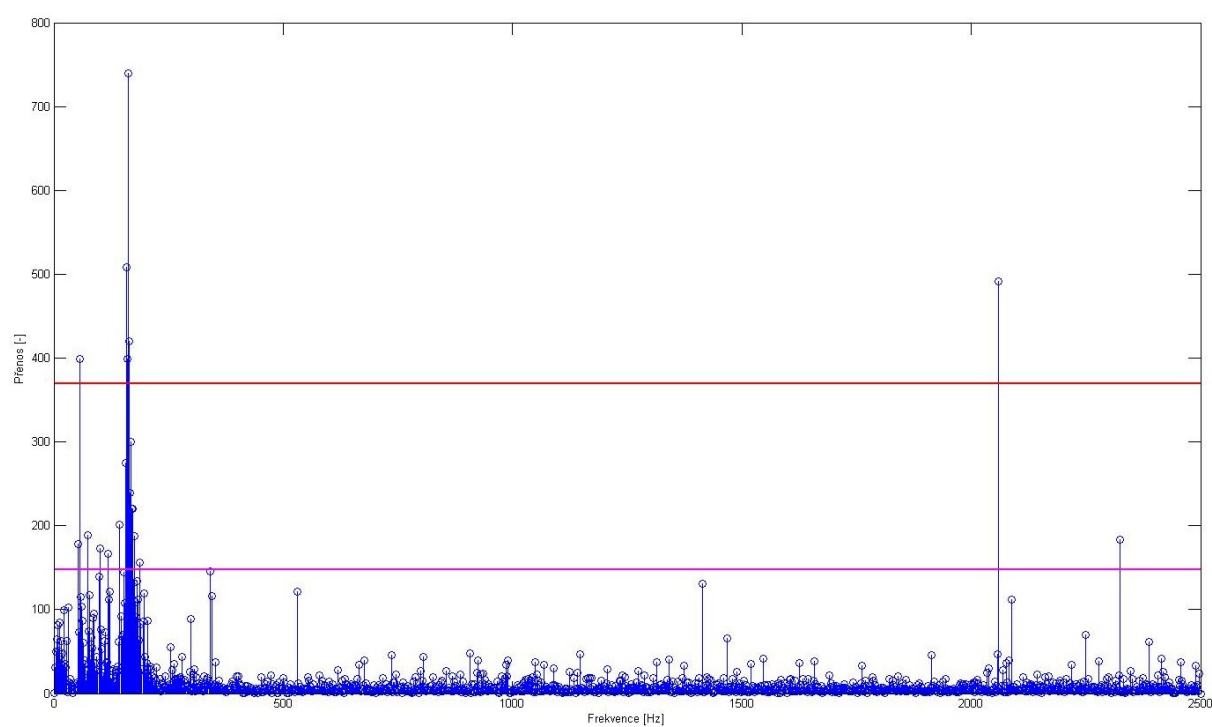
Obrázek 17: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 5A



Obrázek 18: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 5B



Obrázek 19: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 5C



Obrázek 20: Přenosová funkce ($\Delta f = 2$ Hz) včetně rozhodovacích úrovní. Konfigurace 5D